

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Ing. Aneta Zatočilová

MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ PŘÍMOSTI OSY ROTAČNÍCH VÝKOVKŮ POMOCÍ FOTOGRAMMETRIE A ANALÝZY OBRAZU

MEASUREMENT AND EVALUATION OF AXIS STRAIGHTNESS OF ROTARY FORGINGS USING PHOTOGRAMMETRY AND IMAGE ANALYSIS

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: doc. Ing. Jan Brandejs, CSc.

Oponenti:

Klíčová slova

Výkovek, kování, detekce hran, fotogrammetrie, měření přímosti osy, optické měření.

Key words

Forging, edge detection, photogrammetry, axis straightness measurement, optical measurement.

Místo uložení práce:

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| 1 ÚVOD..... | 4 |
| 2 OPTICKÉ METODY MĚŘENÍ TVARU A ROZMĚRŮ..... | 5 |
| 2.1 Přehled a rozdělení optických metod..... | 5 |
| 2.2 Fotogrammetrie..... | 6 |
| 2.2.1 Fotogrammetrické systémy a jejich rozdělení | 6 |
| 2.2.2 Základních pojmy a principy | 7 |
| 2.3 Souhrn literárních zdrojů z oblasti měření výkovků..... | 9 |
| 2.4 Analýza a zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše | 11 |
| 3 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ..... | 13 |
| 4 MATERIÁL A METODY..... | 14 |
| 4.1 Návrh metodiky měření | 14 |
| 5.1.1 Kalibrace kamer | 14 |
| 4.1.2 Detekce hran | 16 |
| 4.1.3 Prostorová orientace – složení informací ze snímků do 3D | 18 |
| 4.1.4 Výpočet informací o tvaru a geometrii výkovku | 20 |
| 4.2 Softwarová realizace navržené metodiky v prostředí Matlab..... | 22 |
| 4.3 Experimentální ověření navržené metodiky měření | 23 |
| 4.3.1 Měřicí aparatura a měřené vzorky | 23 |
| 4.3.3 Komparační měření tvaru a rozměrů testovaných vzorků | 26 |
| 5. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ | 27 |
| 5.1 Interpretace výsledků měření vzorků s teplotou okolí..... | 28 |
| 5.2 Interpretace výsledků měření vzorků v zahřátém stavu..... | 31 |
| 6 DISKUSE A VYPLÝVAJÍCÍ NÁVRHY NA OPTIMALIZACI | 32 |
| 7 ZÁVĚR | 36 |
| 8 SEZNAM LITERATURY..... | 37 |
| 9 PUBLIKACE AUTORA | 39 |
| 10 CURRICULUM VITAE..... | 40 |

1 ÚVOD

Základním prvkem fotogrammetrických systémů je obrazový snímač. Vývoj CCD¹ čipu, společně se zdokonalováním počítačů, elektro-optických komponent, laseru a dalších optických zdrojů umožnil úspěšné zavedení optických metod měření a vyhodnocování v mnoha vědních oborech. Optické metody měření mají z hlediska rozmanitosti aplikací interdisciplinární charakter. Jsou úzce spojeny s metodami počítačového zpracování obrazu, počítačovou grafikou, s metodami CAD², ale také se základními vědami jako je matematika, fyzika a informatika. V posledních patnácti letech došlo ke značnému pokroku ve vývoji technologií měření tvaru prostorových objektů a to zejména díky sjednocení poznatků z oblastí počítačového vidění a počítačové grafiky. V současné době existuje široká škála metod měření tvaru objektů. Liší kromě principu funkce, zejména dosahovanou přesností a pracovní vzdáleností, z čehož vyplývá také oblast jejich aplikace. Přesto stále existují případy, kdy dostupné měřicí technologie není možné použít. Takovou oblastí je i měření tvaru a rozměrů výkovků [1, 2].

Rozměrné výkovky rotačního tvaru jsou výchozími polotovary, které slouží k výrobě komponent zejména pro lodní, jaderný nebo petrochemický průmysl. Polotovary se kovájí při teplotě 850 až 1300 °C v otevřené formě pomocí hydraulických lisů s tlakem, který odpovídá až 10 000 tunám. Po kování obvykle probíhá kontrola tvaru a rozměrů. V případě výkovků rotačně symetrického tvaru jsou nároky kladeny zejména na válcovitost a přímost osy. Součástí výrobního procesu bývá často rovnání výkovku pomocí tříbodového ohybu na hydraulickém lisu.

Dosud se běžně řeší měření rozměrných výkovků s vysokou teplotou pomocí jednoduchých přípravků ručně. Dotykové měření však neposkytuje dostatečnou flexibilitu, bezpečnost, rychlost a přesnost měření. Vzhledem k tomu, že se jedná o cenově velmi nákladnou, často malosériovou až kusovou produkci, nároky na efektivitu výroby se neustále zvyšují, což znamená také vyšší nároky na tvarovou a rozměrovou přesnost výkovků. Z toho vyplývají požadavky na přesné, rychlé a bezpečné měření. Jak uvádějí aktuální literární prameny, v době digitálních technologií již byl ruční způsob měření výkovků překonán. Většina dostupných bezdotykových systémů není možné použít, zejména z důvodu velkých rozměrů a vysoké teploty měřených polotovarů.

¹ CCD (charge-coupled device) - snímač obrazové informace

² CAD (Computer aided design) – počítačem podporované navrhování

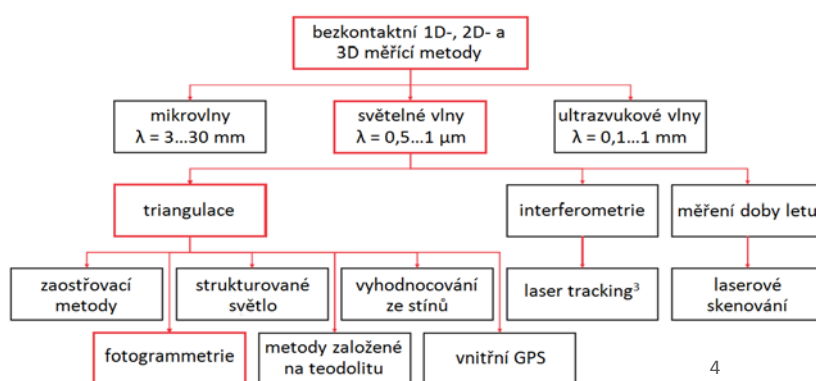
2 OPTICKÉ METODY MĚŘENÍ TVARU A ROZMĚRŮ

2.1 Přehled a rozdělení optických metod

Metody trojrozměrné digitalizace se často rozdělují na aktivní a pasivní. Označení aktivní se používá pro systémy, které pracují na principu interakce mezi objektem či jeho okolím a nějakým snímačem. Ta může nastat:

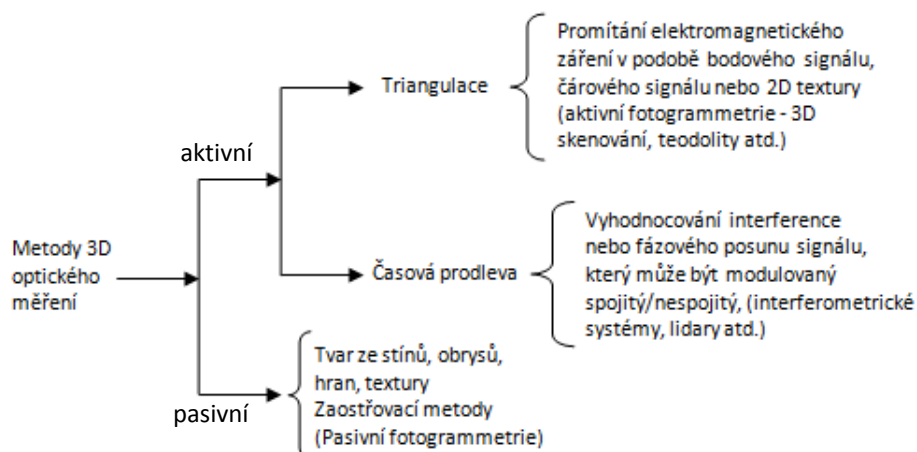
- fyzickým kontaktem mezi snímačem a objektem (kontaktní 3D skenery),
- emisí světla (strukturovaného nebo bílého) a následným snímáním světelné stopy vzniklé na objektu optickým systémem,
- emisí elektromagnetické vlny [3].

Jsou-li metody označovány jako „optické bezkontaktní“ znamená to, že pracují pouze s elektromagnetickým zářením. Obrázek 2-1 ukazuje rozdělení metod podle vlnové délky, která je snímačem vyhodnocována [2].



Obr. 2-1: Rozdělení bezkontaktních optických metod měření dle vyhodnocované vlnové délky³ [2].

Často se uvádí rozdělení podle principu získávání třetího rozměru, tedy vzdálenosti měřeného bodu od obrazové roviny snímače. Třetí rozměr může být vyhodnocen pomocí triangulace nebo některou z metod měření časové prodlevy [2] (viz obr. 2-2).

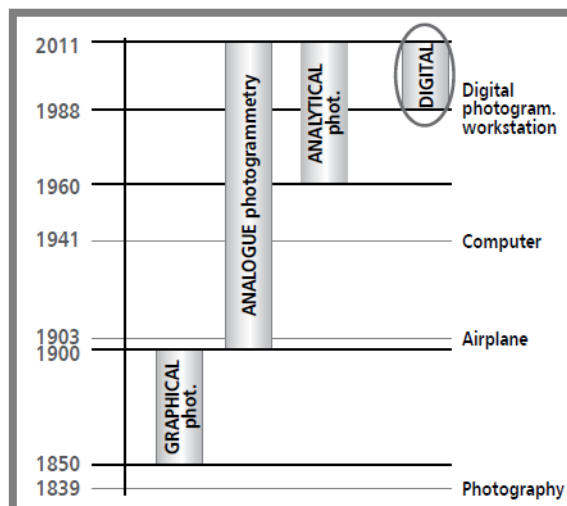


Obr. 2-2: Bezkontaktní metody měření tvaru objektů založené na obrazových snímačích, podle [3].

³Laser tracking – metoda optického měření, založená na interferometrickém měření časové odezvy laserového signálu

2.2 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je metoda optického měření, která je založena na zpracování a vyhodnocování informací z fotografických snímků. Vzhledem ke svému dlouhému vývoji se stala fotogrammetrie rozsáhlým souborem měřicích metod s širokou škálou aplikací. Pro průmyslové měření, kterým se zabývá tato práce, se zpravidla využívá digitální blízká fotogrammetrie⁴ [4].



Obr. 2-3: Historický vývoj fotogrammetrie [2].

2.2.1 Fotogrammetrické systémy a jejich rozdělení

Fotogrammetrie se často rozděluje na pasivní a aktivní, dle použití zdroje světla. Pasivní fotogrammetrie byla známá přibližně o 150 let dříve než fotogrammetrie aktivní. Pasivní fotogrammetrie využívá k měření pouze fotografické snímky bez jakékoli přidaného zdroje světla. Odpovídající si pixely ve snímcích jsou nalezeny na základě výrazných entit ve scéně – ty mohou být jak přirozené nebo cíleně rozmístěné v měřeném prostoru (viz kap. 2.6.1) [4, 5, 6].

Aktivní fotogrammetrie se začala v průmyslu využívat až koncem 20. století, což souviselo s rozvojem digitální fotografie a výpočetní techniky. Interakce mezi optickým snímačem a měřeným objektem je zajištěna pomocí uměle vytvořené elektromagnetické vlny. Světelný zdroj promítaný na povrch objektu slouží identifikaci odpovídajících si (homologických) pixelů v jednotlivých snímcích. Při použití dvourozměrného světelného vzoru umožňuje tento princip měřit současně pixely v celé ploše. Aktivní fotogrammetrické systémy získaly označení 3D skenery. Nejčastěji se bezdotykové 3D skenery dělí podle použitého zdroje záření. V průmyslu jsou nejčastěji zastoupeny laserové 3D skenery (laser scanner) a optické 3D skenery (optical 3D scanner, structured-light 3D scanner, fringe projection scanner) [4, 5, 6].

Dle počtu snímků se dělí fotogrammetrie na jednosnímkovou, vícesnímkovou a stereofotogrammetrii. Trojrozměrná rekonstrukce z jediného snímku je možná

⁴ Za blízkou fotogrammetrií je považováno měření objektu ze vzdálenosti $h < \text{cca } 300\text{m}$ (např. v případě letecké fotogrammetrie platí $h > \text{cca } 300\text{ m}$, satelitní $h > \text{cca } 200\text{ km}$ atd). Digitální fotogrammetrie využívá výhradně digitální snímky a zpracování pomocí počítače.

pouze v případě, že jsou známy informace o geometrii měřeného objektu. Dosahovaná přesnost měření je při této konfiguraci závislá primárně na měřítku zobrazení. Rekonstrukce z více snímků zpravidla využívá algoritmy pro vícesnímkovou triangulaci, např. algoritmus „Bundle adjustment“ (viz [7]). Na základě použitého matematického algoritmu je určen minimální počet snímků a referenčních bodů potřebných pro automatický výpočet polohy fotoaparátu. V oblasti blízké fotogrammetrie je vícesnímková konfigurace nejobvyklejší. Výhodou je možnost pořídit prakticky neomezený počet snímků z libovolných pozic a směrů což zajišťuje vyšší přesnost. Stereo konfigurace je typická pro 3D optické skenery [6]. Fotogrammetrické systémy je možné rozdělit na off-line nebo on-line. Off-line systémy se vyznačují tím, že nejdříve probíhá snímkování pomocí minimálně dvou snímků, při použití jednoho nebo více fotoaparátů. Následuje fáze orientace z celé sady snímků. K orientaci a vyhodnocení 3D souřadnic hledaných bodů nejčastěji využívá samokalibrace pomocí algoritmu „Bundle adjustment“ (viz [xx]). Univerzalita off-line systémů spočívá zejména v tom, že nejsou omezeny danou konfigurací kamer - polohou a počtem, volbou objektivů. Obecně dosahují off-line systémy vyšší přesnosti než systémy online (podle [4] okolo 0,05 mm) [4, 5, 6]. On-line fotogrammetrie umožňuje průběžné měření 3D souřadnic na objektu podobně jako souřadnicové měřicí stroje (CMM). On-line systém se obvykle skládá alespoň ze dvou synchronizovaných kalibrovaných kamer s předem známou polohou a orientací vzhledem ke stanovenému souřadnému systému. Zásadním rozdílem oproti off-line fotogrammetrii je tedy schopnost měření a vyhodnocení v reálném čase. Přesnost on-line systémů bývá obvykle nižší než přesnost off-line systémů, neboť jsou omezeny počtem snímků. Speciálním typem on-line systému jsou *Stacionární vícesnímkové systémy určené pro kontrolu kvality* [6]. Tyto systémy bývají součástí výrobní linky, kde slouží ke kontrole kvality. Jsou vybaveny několika kamerami nebo fotoaparáty s neměnnou polohou. Z toho vyplývá omezený měřicí prostor. Na druhou stranu mohou být tyto systémy přizpůsobeny pro konkrétní úlohy měření, což umožňuje určitý stupeň automatizace. Fotoaparáty zůstávají v daných podmínkách kalibrované delší časové období. Kalibrace může probíhat automaticky pomocí pevného a předem známého kalibračního pole. Tyto systémy umožňují rychlé měření v aktuálním čase, za kterým následuje analýza požadovaných parametrů a přenos výsledků přímo pro kontrolu zařízení ve výrobní lince [6].

2.2.2 Základních pojmy a principy

Fotografický snímek objektu je jeho centrální projekcí, přičemž středem promítání je střed objektivu a obrazovou rovinou je obrazový snímáček (v případě digitální fotogrammetrie). Tvar a pozice objektu je získána na základě rekonstrukce svazku paprsků. Prostorová orientace každého paprsku je dána obrazovým bodem \mathbf{P}' , příslušným středem perspektivy \mathbf{O}' a odpovídajícím objektovým bodem \mathbf{P} . Pokud je známá geometrie fotoaparátu a jeho poloha v objektovém souřadném systému, potom je možné definovat také každý paprsek dopadající na obrazový snímáček. Na základě průniku alespoň dvou odpovídacích si prostorově nezávislých paprsků může být určena poloha objektového bodu v prostoru [2].

Základním parametrem fotogrammetrického snímku je jeho měřítko obrazu m . Měřítko definuje vztah mezi konstantou kamery c a vzdáleností objektu L , případně mezi vzdáleností v rovině objektu X , jejíž směr je rovnoběžný s odpovídající vzdáleností x' v obrazové rovině. Měřítko obrazu je rozhodujícím faktorem při

odhadu detailů ve snímku, ale také při odhadu přesnosti měření. Každá chyba v obrazovém souřadném systému se promítne v objektovém souřadném systému jako násobek měřítka obrazu. V následující rovnici m vyjadřuje měřítko obrazu, c je konstanta kamery (ohnisková vzdálenost zvětšená o vzdálenost při zaostření), X je poloha bodu v ose x v objektovém prostoru a x' poloha bodu v ose x v obrazové rovině [2].

$$m = \frac{L}{c} = \frac{X}{x'} \quad (1)$$

Základním předpokladem pro fotogrammetrické měření je znalost parametrů vnitřní a vnější orientace kamery (internal/external orientation – IO/EO). V obou případech vycházejí matematické vztahy z modelu dírkové komory. Parametry vnitřní orientace definují rozdíly mezi skutečnou optickou soustavou fotoaparátu a ideálním modelem dírkové komory. Jsou to:

- ***Střed zobrazení H' (principal point)***. Průsečík hlavní optické osy s obrazovou rovinou, tedy nadir středu promítání. Uvádí se v souřadnicích obrazového souřadného systému (x'_0, y'_0) . Pro standardní fotoaparáty je přibližně totožný se středem snímku $H' \approx M'$ [8].
- ***Konstanta kamery c (principal distance)***. Vzdálenost mezi středem promítání a obrazovou rovinou v záporném směru osy z . Konstanta kamery je přibližně rovna ohniskové vzdálenosti při zaostření do nekonečna, tedy $c \approx f$ [32, 59].
- ***Konstanty funkce popisující zobrazovací chybu***. V praxi se často do výpočtů zahrnuje pouze radiální zkreslení $\Delta r'$ [8].

Parametry EO popisují polohu fotoaparátu v prostoru a vyjadřují vztah mezi světovým souřadným systémem a souřadným systémem fotoaparátu. Souřadný systém fotoaparátu $x'y'z'$ se nachází v jeho středu promítání a vůči světovému souřadnému systému XYZ je definován translačním vektorem T a rotační maticí R . Parametry IO i EO je možné určit pomocí vhodné metody kalibrace. Ta je zpravidla založena na průmětu konkrétních pozorovaných objektů do obrazové roviny, přičemž je skutečná aparatura nahrazena modelem dírkové komory. Uvažujeme konečný počet u neznámých parametrů kamery a n počet pozorovaných parametrů, které jsou reprezentovány souřadnicemi referenčních bodů v prostoru a ve snímku. Vztah pozorovanými parametry a neznámými popisuje následující soustava rovnic [8]:

$$\hat{l} = l + v = A\hat{x} \quad (2)$$

Kde $\hat{l}(n, l)$ je vektor pozorovaných parametrů (souřadnic referenčních bodů ve snímku). $A(n, u)$ je Jacobiho matice, která obsahuje diferenciální podíly popisující funkční vztah mezi parametry. Matice A obsahuje pro každý pozorovaný bod dva řádky a počet sloupců je roven počtu neznámých. $\hat{x}(u, l)$ je vektor neznámých. Řešení této soustavy rovnic může být lineární, nelineární či iterativní [8].

Matematické principy kalibrace kamer a prostorové orientace jsou podrobněji popsány v disertační práci. Hlavním odborným zdrojem, ze kterého bylo čerpáno je kniha *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*⁵.

⁵ LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Fundamental methods, p. 510. ISBN 978-184995-057-2.

2.3 Souhrn literárních zdrojů z oblasti měření výkovků

Dotykové měření výkovků:

- 1986 Siemer [9] popsal ve svém článku dotykový systém, který byl závislý na otáčivém pohybu výkovku při kování
 - Nye *et al.* [10] v roce 2001 publikoval studii, která popisuje specifický dotykový měřicí systém, který byl zabudován do manipulátoru

Bezdotykové měření založené na aktivní fotogrammetrii a TOF:

- Zhisong 2009 [11]. Článek navazuje na studii publikovanou v roce 1993 [12]. Představuje systém, který se skládá z vyhodnocovací stanice TOF, skenovacího zařízení se dvěma stupni volnosti a sféricko-paralelního mechanismu se dvěma motory. Přesnost systému se pohybuje v řádech milimetrů, v článku není uveden celkový čas měření.
- LaCam Forge od firmy Ferrotec a Menteq Technologies Inc. [13]. Na internetových stránkách je popsán komerční systém založený na principu LIDARU. Přesnost měření se pohybuje v řádech milimetrů. Hlubší technické specifiky ani cenu systému nebylo možné získat.
- TopScan od firmy Tecnogamma [14]. Systém se skládá z laserového projektoru, spektrálně-selektivní videokamery a přijímače. Projektor promítá na povrch výkovku laserové pruhy s různými vlnovými délkami. Odražené paprsky zpět do přijímače jsou následně analyzovány z hlediska fázového posunu. Systém je určen k měření výkovků o teplotě 350 až 1150 °C a maximálních rozměrech 7 m. Je schopen zaznamenat až 120 000 bodů za sekundu. Umožňuje rekonstrukci komplexní geometrie, měření průměru, délky výkovku, excentricity nebo přímosti osy. V prospektech je uvedena přesnost měření ± 5 mm při měření délky, ve sférických souřadnicích ± 3 mm.

Bezdotykové měření založené na aktivní fotogrammetrii a triangulaci:

- Laserový systém firem IMEGO, Mefos a SINTEF [15]. Systém se skládá z laserového projektoru, a spektrálně-selektivní kamery. Při měření manipulátor otáčí s výkovkem a kamera vytvoří několik překrývajících se snímků s vysokým rozlišením. Snímky slouží k sestavení 3D modelu. Systém umožňuje měření průměru, délky, křivosti osy a odchylek od požadovaného tvaru. Tento systém je stále ve fázi vývoje.
- Jia *et al.* [16] popisuje ve svém článku metodu měření založenou na dvou monochromatických CCD kamerách, xenonové lampy a obslužného počítače. CCD snímače jsou vybaveny filtry, které propouští pouze úzké spektrum kratších vlnových délek. V článku je poprvé popsáno využití spektrálně selektivní metody a metody triangulace pro účely měření výkovků s vysokou teplotou. Princip spektrálně selektivní metody spočívá v selekci spektra, ve kterém nejsou CCD ovlivněny radiací výkovku a současně jsou citlivé na xenonové světlo. Článek se zaměřuje na popis navržené metodiky měření a zpracování dat, neuvádí však výsledky experimentů, které by objasnily přesnost a rychlost měření.
- Liu *et al.* [17]. Tento článek popisuje další vývoj metody popsané v [26]. Zásadní změnou je využití proužkové projekce, která zásadním způsobem zvýšila rychlost vyhodnocování dat. K detekci promítaných pruhů byl použit modifikovaný

Gaussův model a spektrálně selektivní metoda popsaná již v roce 2009. Odchylka rozměrů čtyř desek měřených v laboratorních podmínkách je nižší než 0.8%

Bezdotykové měření založené na pasivní fotogrammetrii a analýze obrazu:

- *S. B. Dworkin, T. J. Nye. 2004 [18].* Studie popisuje metodu měření rozměrů výkovku vysoké teploty pomocí adaptivního prahování a detekce hran. Přitom je testována přesnost měření u různých typů vstupních snímků: monochromatické snímky ve viditelném spektru, barevné snímky ve viditelném spektru a monochromatické snímky s IR filtrem⁶. Z článku vyplývá, že nejlepší vlastnosti pro prahování a detekci hran mají monochromatické snímky s IR filtrem.
- *Ch. Hu, B. Liu, X. Song. 2008 [19].* Článek představuje novou metodu detekce hran, která překonává problémy ostatních detektorů při aplikaci na výkovky s vysokou teplotou. Detekce vychází ze známého Cannyho algoritmu (viz [20]). Celý proces detekce výkovků s vysokou teplotou je v článku rozdělen do tří hlavních kroků – předzpracování snímku, hlavní detekce hran a finální zpracování snímků za účelem validace hran.

Testování vlivu teploty na funkci 3D skeneru:

- *Yamauchi [21]* ve svém článku popisuje experimentální a teoretickou analýzu chyby měření laserového skeneru KONICA MINOLTA VIVID 9i způsobené tepelně ovlivněnou oblastí válcového tvaru, která se nachází mezi měřeným objektem a 3D skenerem. Z výsledků vyplývá, že skutečná chyba měření je přibližně čtyřikrát menší než vypočtená, a že s rostoucí teplotou se mění naměřené hodnoty v záporném směru, tzn. naměřené rozměry i vzdálenost klesá.

⁶ IR filtr - propouští pouze IR paprsky o vlnové délce vyšší než specifikace daného filtru.

2.4 Analýza a zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše

Literární prameny z oblasti měření výkovků je možné rozdělit do tří kategorií, podle způsobu provedení a způsobu vyhodnocování dat:

- měření založené na aktivní fotogrammetrii a metodách TOF,
- měření založené na aktivní fotogrammetrii a metodách aktivní triangulace,
- měření založené na pasivní fotogrammetrii a metodách pasivní triangulace.

Všechny zmíněné metody mají své výhody i nedostatky. Obecnou nevýhodou TOF systémů je jejich vysoká cena vyplývající z nutnosti vysoce přesného měření signálu v čase. LIDARy jsou určeny pro vysokou pracovní vzdálenost, jejich přesnost je nižší než v případě systémů založených na triangulaci. V oblasti měření výkovků je pracovní vzdálenost kolem 20 m a přesnost v řádech mm.

V případě systémů založených na vyhodnocování vzdálenosti metodou aktivní triangulace byl zpočátku řešen problém s dosažením dostatečného kontrastu promítaného vzoru na povrchu výkovku, který má vysokou intenzitu jasu. Tento problém byl vyřešen implementací spektrálně selektivní metody a použitím xenonového osvětlení. V případě pasivní fotogrammetrie může být naopak výhodou vysoká intenzita jasu na povrchu výkovku, neboť zajistí vysoký kontrast mezi polotovarem a pozadím.

Obecnou nevýhodou triangulace je omezená viditelnost v otvorech a konkávních oblastech. Při požadavku na zachycení celé geometrie, je nutné použití více kamer nebo otáčení s měřeným objektem. Otáčení polotovaru pomocí manipulátoru by do měření vnášelo chybu. V případě rotačně-symetrických objektů však stačí k plnému určení jejich tvaru pouze informace o tvaru osy, délce a průměru. Díky tomu je možné značně zjednodušit celý měřicí proces.

Pokud je autorce známo, v současné době neexistují pro měření výkovků s vysokou teplotou komerční měřicí systémy založené na pasivní fotogrammetrii. Důvodem může být právě problematická analýza obrazu. Publikace v kapitole 2.3.4 však dokazují, že i tímto směrem se ubírá výzkum. Články jsou zaměřeny spíše na dílčí úlohy analýzy obrazu a zmiňují aplikovatelnost navržených metod pro účely měření rozměrů výkovků.

Problémem který je společný u všech zmíněných metod je tepelné proudění vzduchu v okolí objektu s vysokou teplotou, které způsobuje rozdílný lom světla. Tím mohou vznikat odchylky polohy i měřítka měřených entit. Jak uvádí Yamauchi [20], na základě experimentálního měření vlivu teploty na přesnost 3D skeneru bylo zjištěno, že s rostoucí teplotou se mění naměřené hodnoty v záporném směru, tzn. naměřené rozměry i vzdálenost klesá. Při zjištění charakteristiky odchylek je možné řešit korekci těchto odchylek matematicky. Korekce má však smysl pouze při nárocích na odchylky v řádech setin mm, což v oblasti ocelářského průmyslu nebývá běžné. Při měření výkovků je třeba počítat s nerovnosti na povrchu měřeného polotovaru, které jsou způsobeny přítomností okují. Z toho důvodu nebývají nároky na přesnost měření vyšší jak v řádech mm (např. požadavek společnosti Žďas na přesnost do ± 5 mm) a metody subpixelové detekce hran, které se využívají zejména v oblasti aktivní fotogrammetrie, se jeví jako zbytečné.

Po zhodnocení kladů a záporů jednotlivých metod, byl zvolen princip pasivní fotogrammetrie pro řešení zmíněné problematiky. Výhodami měřicího systému

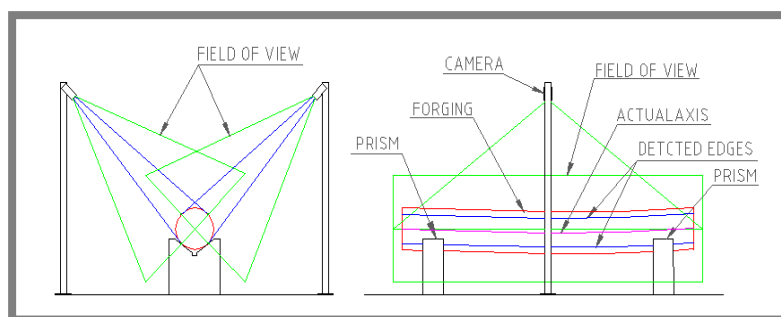
založeného na pasivní fotogrammetrii by měla být jednoduchost, rychlost měření a vyhodnocování a především zásadně nižší cena ve srovnání s aktivními fotogrammetrickými systémy. Z hlediska nároků na reálný provoz vyplývají kritéria, které by měl splňovat specifický bezdotykový měřicí systém pro měření rotačních výkovků s vysokou teplotou:

- *Umístění kamer v dostatečné vzdálenosti od zdroje tepelné emise (eliminace vlivu IR emisí výkovku).*
- *Kalibrace kamer musí být proveditelná z velké vzdálenosti a pro velké zorné pole.*
- *Systém musí umožňovat „real-time“ měření a vyhodnocování, bez nutnosti zásahu do výrobního cyklu výkovku (viz kap. 2.2.1).*

3 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Cílem disertační práce je návrh vlastní metodiky měření přímosti osy rotačních výkovků a její experimentální ověření v laboratorních podmínkách, včetně Popis vlivů na dosahovanou přesnost měření včetně návrhů na optimalizaci. Navržená metodika by měla poskytnout potřebné informace o ose výkovku pro rovnací linku, která zajistí jeho rovnání pomocí třibodového lisu. Hlavním kritériem při návrhu metodiky je aplikovatelnost v podmínkách reálného provozu a implementovatelnost do výrobního cyklu.

První fáze práce je zaměřena na průzkum možných přístupů k řešení tohoto problému. Na základě provedené rešerše byl navržen vlastní přístup, založený na metodě vícesnímkové pasivní fotogrammetrie. Přístup vychází z předpokladu, že skutečný tvar osy válcových výkovků je možné určit (v nejjednodušším případě) pomocí minimálně čtyř hraničních křivek, které leží ve dvou vzájemně kolmých rovinách (viz obr. 3-1). Dvě hraniční křivky výkovku budou získány ze snímků pomocí vhodné metody detekce hran. Tato základní myšlenka bude zakomponována do komplexní metodiky měření. V případě výkovků s velkou délkou by bylo možné použít paralelní konfiguraci kamer a provést měření po částech a následně složit výsledky do jednoho souřadného systému



Obr. 3-1: Konfigurace fotogrammetrického systému se dvěma kamerami [22].

Při návrhu celého systému je třeba zajistit přesně vymezené a kontrolované podmínky s vyloučením intervenujících proměnných. Z toho důvodu bude probíhat návrh a testování v laboratorních podmínkách na vzorcích malých rozměrů. Výsledky řešení budou v závěru práce zhodnoceny z hlediska užitnosti pro reálné podmínky stanovené společností Žďas a.s. Přístup k řešení práce je možné logicky rozdělit na dvě hlavní části, jejich řešení však probíhá souběžně:

- ***Návrh a optimalizace metody kalibrace, detekce hran, vyhodnocování dat a zavedení těchto metod do softwaru.***

Při návrhu dílčích metod jsou uvažovány reálné podmínky a nároky na rychlost a požadovanou přesnost měření, současně musí být systém funkční pro laboratorní testy s dostupným vybavením.

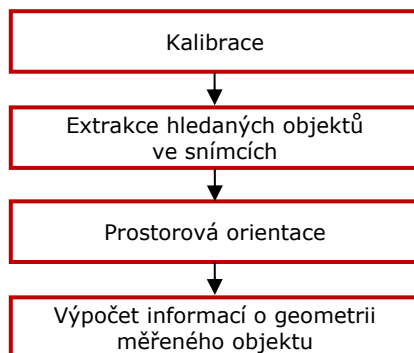
- ***Experimentální měření pro ověření přesnosti systému a jeho optimalizaci z hlediska stanovených cílů.***

Pro experimentální měření a testování funkčnosti bude postaven stand, který bude umožňovat ustavení kamer dle konfigurace navržené v této práci. Pro porovnání přesnosti měření bude využit profesionální průmyslový 3D skener.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Návrh metodiky měření

Následující obrázek znázorňuje typický proces měření pomocí optického fotogrammetrického systému. Na základě výstupů kalibrace jsou nalezené extrahované body ve snímcích transformovány do světového souřadného systému ve správném měřítku – tím je dokončena fáze rekonstrukce geometrie objektu. Následuje výpočet hledaných informací o měřeném objektu.



Obr. 4-1: Hlavní kroky v procesu fotogrammetrického měření.

Navrhovaný optický systém je možné definovat jako (viz kapitola 2.2):

- *Založený na digitální blízké fotogrammetrii*
- *Pasivní (nevyužívá přidané osvětlení)*
- *Vícesnímkový*
- *Stacionární*
- *On-line (viz Stacionární vícesnímkové systémy v kapitole 2.2.1)*

5.1.1 Kalibrace kamer

Metoda kalibrace byla volena na základě vnějších podmínek a nároků na výsledky kalibrace. Kritéria pro volbu metody kalibrace jsou shrnuty v následujících bodech:

- *Počet snímků - 2*
- *Velké zorné pole kamer (několik metrů v reálných podmínkách)*
- *Automatická kalibrace (ideálně bez vstupu uživatele)*
- *Stacionární kamery (teoreticky pouze posun ve vertikálním směru)*
- *Nároky na přesnost nižší (v desetinách mm)*
- *Použití i pro nemetrické kamery (z důvodů laboratorních testů)*

Model pro výpočet parametrů nelineárního zkreslení kamery

Ideálním řešením pro měření v reálných podmínkách s profesionální metrickou kamerou by byl model zkreslení vytvořený na základě předem naměřených dat. Při použití digitálních DSLR však není prakticky možné získat kvalitní data pro vytvoření dostatečně přesného modelu. Z toho důvodu byla zvolena kalibrace založená na inverzním modelu (viz [23]). Algoritmus byl převzat z volně dostupné

databáze Matlab Central⁷. Korekční parametr byl volen uživatelem na základě sledování střední kvadratické odchylky polohy referenčních bodů, které byly zpětně vypočteny pomocí výsledků kalibrace lineárních parametrů na korigovaných snímcích. Obecně je výhodou inverzního modelu především minimální požadavek na počet snímků a na informace o měřené scéně. Navíc umožňuje korigovat i silně zdeformované snímky. Metoda sice řeší pouze zkreslení radiální, nicméně s ohledem na zmíněné nároky na přesnost je korekce dominujícího radiálního zkreslení dostačující. Korekce jednoho snímku s rozlišením 15,1 Mpix trvá v softwaru Matlab cca 30 sekund.

Model pro výpočet parametrů vnitřní a vnější orientace kamery

Z hlediska počtu snímků a snímkovacích poloh je možné použít některou z metod pro kalibraci stereopárů (např. kombinaci relativní a absolutní orientace, která je založena na epipolární geometrii a rovnicích kolinearity), nebo některou z metod pro jednosnímkovou kalibraci (viz [24] a [25]). Z hlediska výpočetní jednoduchosti byla zvolena jednosnímková kalibrace pomocí *prostorové resekce*. Kalibraci pomocí prostorové resekce je možné řešit dvěma způsoby - nelineárním výpočtem pomocí rovnic kolinearity, nebo lineárně pomocí projektivních vztahů. V této práci byla použita lineární metoda kalibrace - konkrétně Přímá lineární transformace (viz [26]).

Metoda pro výpočet polohy referenčních bodů ve snímku

K řešení přímé lineární transformace je zapotřebí minimálně šesti referenčních bodů, které neleží v jedné rovině (tj. šest bodů u nich je známá jejich poloha v prostoru vůči jednomu souřadnému systému). Ve snímku jsou značky reprezentovány jako bílé eliptické oblasti na černém pozadí. Rozpoznání těchto značek se provádí nejčastěji pomocí segmentace obrazu. Obraz se dle zadané prahové hodnoty převede na binární (černobílý). U vzniklých oblastí se analyzují jejich vlastnosti, jako je tvar, počet pixelů v oblasti apod. Následuje eliminace oblastí, které nerepresentují značky na základě kritérií pro velikost oblastí a její tvar. V této práci byla použita čtyři kritéria pro rozpoznání oblastí [27]:

- *Maximální velikost oblasti (počet pixelů) – parametr BigArea*
- *Minimální velikost oblasti (počet pixelů) – parametr SmallArea*
- *Poměr počtu pixelů v oblasti vůči počtu pixelů v konvexní obálce oblasti – parametr Convar.*
- *Poměr počtu pixelů eliptické oblasti počítané z poloos původní oblasti vůči počtu pixelů v původní oblasti – parametr ElipseParam*

Následuje určení středu oblasti. V této práci byla použita metoda Těžiště (podle [27]).

⁷ <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/37980-barrel-and-pincushion-lens-distortion-correction>

4.1.2 Detekce hran

Metoda detekce hran navržená je založena na předpokladu, že díky jednoduchému rotačnímu tvaru výkovků, je přibližná poloha hledaných hran předem známá. S ohledem na charakter analyzovaného obrazu byl navržen algoritmus víceetapové detekce, jehož hlavní kroky jsou shrnuty v následujících bodech:

- 1) Proměření polohy konců výkovku a stanovení mezí pro detekci
- 2) Základní detekce podélných hran
- 3) Nalezení počátečních bodů pro opravu chybně detekovaných hranových bodů
- 4) Oprava chybně detekovaných hranových bodů
- 5) Detekce hran na eliptických koncích výkovku a určení konců výkovku

Celá detekce byla rozdělena do tří algoritmů, které na sebe funkčně navazují. Jsou to:

- *Init Detection (krok 1)*
- *Main detection 1 (krok 2, 3 a 4)*
- *Main detection 2 (krok 5)*

Funkce každého algoritmu je podrobně popsána v následujících kapitolách. Základními nástroji, které byly v algoritmech použity, jsou:

- **Mediánový filtr**
Mediánový filtr zajistí odolnost vůči impulznímu šumu, který je v ploše výkovku reprezentován okujemi apod.
- **Prahování**
Na základě stanoveného prahu v kombinaci s mediánovým filtrem jsou nalezeny přibližné polohy hranových bodů
- **Jednosměrné hledání gradientu v oblasti hran výkovku**
Finální poloha hranových bodů je nalezena jako maximální gradient v blízké oblasti přibližně nalezených bodů
- **Kontrola návaznosti detekovaných pixelů na hranách**
Eliminuje chybně nalezené hranové body, kontrolou polohy okolních bodů
- **Vyhlazení nalezených hran**
Upraví polohu nalezených hranových bodů interpolací pomocí zvolené metody vyhlazení.

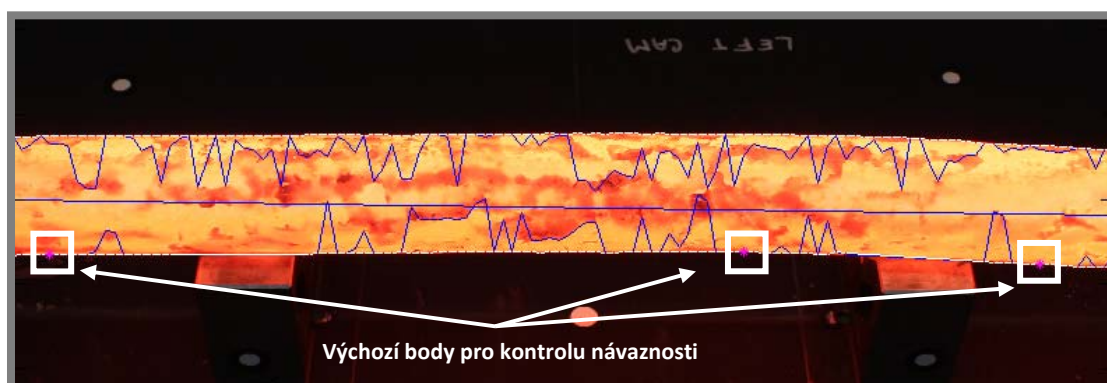
Iniciální detekce byla navržena tak, aby dosahovala vysoké spolehlivosti nalezení správné hrany. Přesnost polohy nalezené hrany není v tomto kroku zásadní. Detekce musí být především odolná vůči impulznímu šumu v oblasti uvnitř výkovku. Nalezené body slouží k automatickému nastavení hranice pro hlavní detekci na podélných hranách. Vzdálenost odsazení hranic od nalezených bodů je v softwarovém rozhraní nastavitelná. Stejně jako šířka a poloha hranic, mezi nimiž se nacházejí v-bloky. V těchto oblastech detekce na spodní hraně neprobíhá. Plovoucí okno s mediánovým filtrem postupuje od středového bodu ve snímku v horizontálním směru a porovnává medián vždy dvou sousedních oken. Pokud dojde k překročení prahové hodnoty, která je rovněž nastavitelná, je hranový bod nalezen.

V případě hlavní detekce, která probíhá na podélných hranách výkovku, je třeba zajistit co nejpřesnější nalezení správné hrany (v pixelovém rozlišení). Algoritmus rozdělen do tří fází, které jsou výše popsány jako body 2, 3 a 4. V první fázi jsou

analyzovány vertikální řezy, jejichž vzdálenost je možné měnit v uživatelském rozhraní. V každém řezu se pohybují dvě horizontální plovoucí okna směrem od horizontální osy snímku k vnějším okrajům. Obě okna jsou vzájemně posunuta vertikálně o jeden pixel (při měření za tepla o velikost mediánového okna). Z pixelů v každém okně se počítá medián, následně se počítá rozdíl mediánů z obou oken a hodnota tohoto rozdílu se porovnává s prahovou hodnotou. Následně probíhá kontrola a oprava polohy každého nalezeného hranového bodu (včetně chybně nalezených). Na každý bod je vloženo statické okno o velikosti 1x7 pixelů tak, že původní bod leží uprostřed okna. V tomto okně je počítán rozdíl intenzity mezi sousedními pixely. Následně jsou rozdíly seřazeny podle velikosti a nový hranový bod má souřadnici, která odpovídá největšímu rozdílu intenzit, respektive vždy je volen první ze sousedních pixelů. Tento krok zajistí nezávislost nalezených hran na uživatelem zvolené prahové hodnotě a šířce mediánového okna.

Ve druhé fázi je třeba najít několik bodů, které skutečně leží na hraně výkovku. Tyto body slouží jako výchozí body pro algoritmus který kontroluje spojitost nalezených hranových bodů. Metoda nalezení správných hranových bodů vychází z předpokladu, že takový bod bude s největší pravděpodobností ležet v nejdelší spojitě oblasti, tzn. v nejdelší oblasti kde je poloha y-ové souřadnice hranových bodů přibližně stejná. Algoritmus nejdříve porovnává y-ovou souřadnici sousedních hranových bodů. Pokud je rozdíl mezi sousedními body vyšší než stanovený práh, uloží polohu bodu a pokračuje v kontrole. Tímto rozdělí hranové body do pomyslných podoblastí s přibližně stejnou souřadnicí y. Následuje porovnání délky oblastí. Hledané body jsou definovány jako body které leží nejbližší prostřednímu řezu v nejdelší spojitě oblasti.

Poslední fáze hlavní detekce slouží opravě chybně nalezených hranových bodů. Algoritmus nejdříve hledá rozdíly mezi y-ovou souřadnicí sousedních bodů, stejným způsobem jako ve fázi dvě. V tomto případě však algoritmus probíhá směrem od růžové značky hvězdy na obě strany. Pokud tedy dojde k překročení prahu na y-ové souřadnici, je již známo, který se sousedních bodů leží na hraně a který je třeba opravit. V řezu, kde byl nalezen chybný bod se provede oprava pomocí algoritmu, který byl popsán ve fázi jedna, s tím rozdílem, že statické okno je vloženo do řezu tak, že jeho prostřední bod má souřadnici y stejnou jako sousední již zkontrolovaný bod.

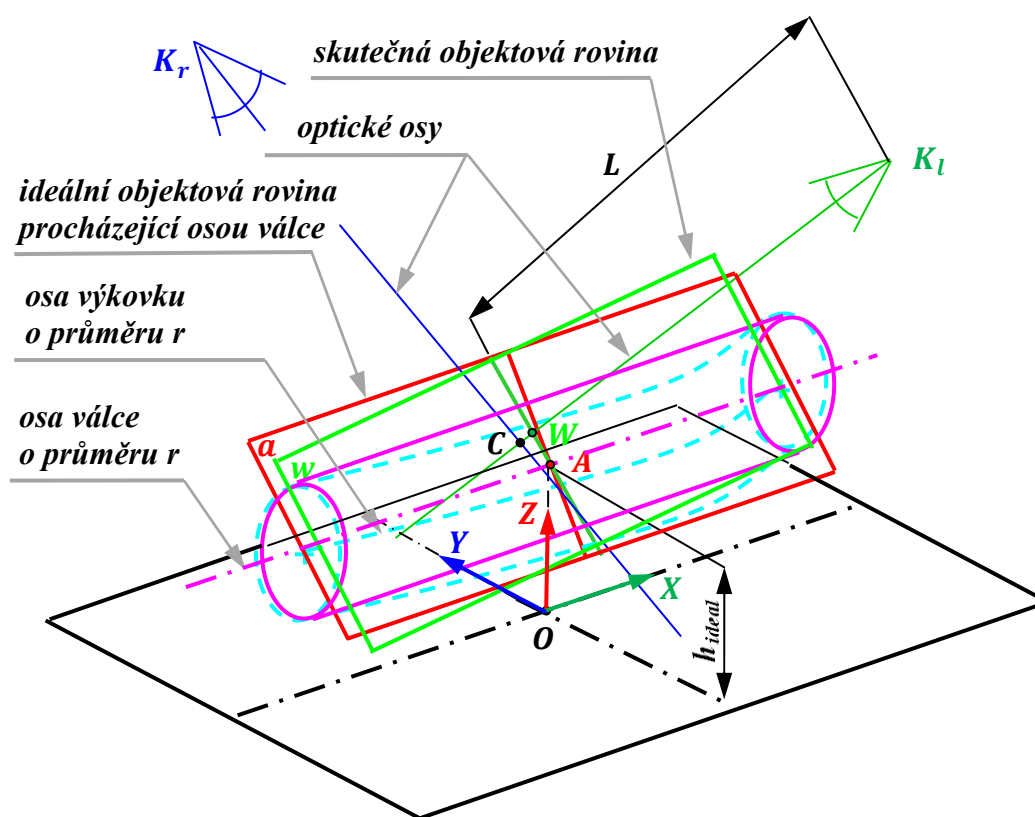


Obr. 4-1: Zobrazení výsledku 1. (modré hrany) a 2. (bílé hrany) fáze hlavní detekce včetně výchozího bodu pro kontrolu návaznosti (růžová hvězda). Je zřejmé, že z důvodu nastavené nízké prahové hodnoty bylo velké množství bodů v první fázi detekce nalezeno chybně uvnitř výkovku. Druhý krok zajistil správnou opravu všech chybných bodů..

Posledním krokem, který se týká detekce hran ve snímcích, je doplnění chybějících bodů v oblasti prizmat na spodní hraně a vyhlazení obou hran. Doplnění bodů bylo jednoduše provedeno pomocí 1D interpolace chybějících y-ových souřadnic, podle x-ových souřadnic všech řezů. V softwaru Matlab byla použita funkce *Interpl* a metoda *Spline*. Vyhlazení y-ových souřadnic na obou hranách bylo následně provedeno pomocí funkce *Smooth*. V současné verzi navrženého softwaru byla použita metoda klouzavého průměru (moving) na detekované hrany a metoda Savitzky-Golay (sgolay) na výslednou osu.

4.1.3 Prostorová orientace – složení informací ze snímků do 3D

Prostorová orientace je proces transformace bodů extrahovaných z jednotlivých snímků do skutečného měřítka v milimetrech a do světového souřadného systému. Provádí pomocí měřítka ve snímku, rotační matice a translačního vektoru, které popisují polohu a orientaci kamer.

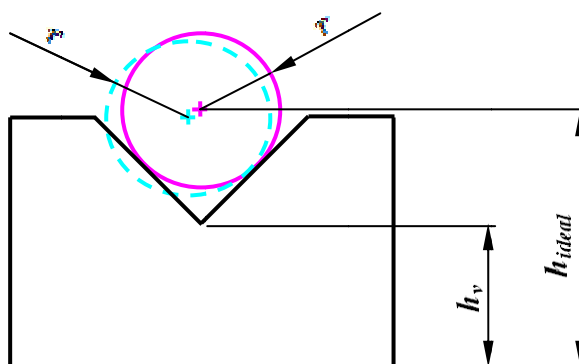


Obr. 4-2: Schéma znázorňující polohu ideálního válce (růžová) a skutečného výkovku (tyrkysová), vůči světovému souřadnému systému. h_{ideal} představuje výšku ideálního válce, který leží ve stejných prizmatech jako výkovek a má stejný průměr. Teoretický průsečík optických os je označen jako C . Objektové roviny jsou označeny jako a a w ; průsečík optické osy s rovinou w je označen jako W .

Výpočet měřítka se provádí podle vztahu $m = L/c$ (kde L je objektová vzdálenost a c je konstanta kamery). Všechny body ležící v jedné rovině rovnoběžné s obrazovou rovinou, mají stejné měřítko. Při průmětu výkovku do obrazové roviny je třeba najít správnou vzdálenost L objektové roviny od středu promítání, v níž leží hranové body. Vzhledem k tomu, že výkovek není válec a jeho osa je prostorová křivka, není

možné najít takovou objektovou rovinu, v níž by měly všechny body promítnuté do snímku stejné měřítko. Při aplikaci konstantního měřítka na všechny hranové body výkovku tedy dochází k aproximaci. Jednotné měřítko musí být voleno tak, aby chyba vlivem aproximace byla co nejmenší. Výpočet měřítka byl založen na představě, že existuje válec, který má stejný průměr jako výkovek a leží ve stejných prizmatech (viz obr. 4-3). Výšku osy tohoto válce je možné vypočítat ze známé geometrie prizmat a průměru výkovku:

$$h_{ideal} = h_v + r \cdot \sqrt{2} \quad (3)$$



Obr. 4-3: Odvození polohy ideální osy výkovku pomocí válce se stejným poloměrem r na základě známé geometrie v-bloků.

Objektovou vzdálenost L je možné definovat jako vzdálenost středu promítání od průsečíku optické osy s rovinou w , která je rovnoběžná s obrazovou rovinou a prochází bodem A . K výpočtu polohy teoretické osy výkovku je tedy třeba znát průměr výkovku. Ve fázi kontroly tvaru a rozměrů je průměr výkovku již známý. Nicméně měřicí systém by byl závislý na vstupní informaci o průměru. Tu by mohl uživatel při každém měření zadat manuálně, nebo by mohla být importována z kovacího stroje (pokud takovou informaci ve vhodné podobě má). Velikost průměru je možné automaticky měřit pomocí kamery, jejíž obrazová rovina je přibližně rovnoběžná s čelní plochou výkovku. Vzhledem k tomu, že cílem této práce je spíše návrh metodiky než kompletní realizace softwarového i hardwarového řešení, bylo testování navrženého softwaru zjednodušeno uživatelským zadáním velikosti průměru.

Objektová rovina, jejíž měřítko je známé, je rovnoběžná s obrazovou rovinou. Natočení obrazové roviny kolem osy Z však způsobuje rozdílnou perspektivu ve snímku. Na straně výkovku kde je rovina w blíže ke středu promítání, jsou vypočtené průměry největší, na opačné straně naopak menší než je jejich skutečná velikost. Z důvodu korekce perspektivního zkreslení bylo zavedeno individuální měřítko $m_{corr,i}$, pro každý analyzovaný řez $i=1 \dots n$ (podle vztahu (1)):

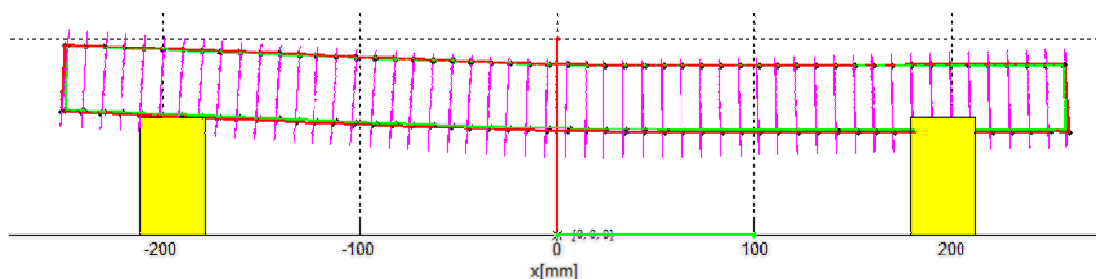
$$m_{corr,i=1}^n = \frac{L + \Delta l_i}{c} \quad (4)$$

Kde Δl_i je malá korekční vzdálenost, která v každém řezu odpovídá vzdálenosti mezi rovinou a rovinou w ve směru optické osy.

4.1.4 Výpočet informací o tvaru a geometrii výkovku

Díky prostorové orientaci leží všechny hranové body ve světovém souřadném systému. Spojením bodů, které náleží jedné hraně ve snímku, vzniknou čtyři křivky, které jsou na povrchu výkovku vzájemně pootočené zhruba o 90°. Nejjednodušším způsobem jak získat osu výkovku z těchto křivek, je proložení bodů, které náleží jednomu příčnému řezu, pomocí kružnic. V ideálním případě by však měly být řezy kolmé na osu výkovku. Z toho důvodu bylo prokládání kružnic hranovými body řešeno ve dvou krocích. V prvním kroku byly využity body z příčných řezů, které jsou rovnoběžné s rovinou yz. Prokládání kružnic bylo řešeno pomocí metody známé jako Taubin method⁸. Středů kružnic představují body na ose výkovku.

V druhém kroku jsou body na ose výkovku využity k vytvoření normálových vektorů a nových řezových rovin. Následně byly nalezeny průsečíky všech křivek s těmito rovinami a proces prokládání kružnic byl zopakován. Tento proces by mohl být řešen iteračně, dokud by změna polohy bodů na ose výkovku nebyla dostatečně malá. Jelikož se ukázalo, že natočení řezů nemá na výsledky měření zásadní vliv, byly v aktuální verzi softwaru použity pouze dva kroky.



Obr. 4-4: Boční pohled na kružnice proložené detekovanými body v rovině XZ – v druhém kroku jsou normály kružnic kolmé na osu výkovku.

Rozměry výkovku

Délka byla vypočtena jako přímá vzdálenost mezi středem první a poslední kružnice. Průměr byl počítán jednak v každém řezu samostatně, ale také jako hodnota mediánu ze všech řezů. V jednotlivých řezech nemůže být hodnota průměru brána z výsledku prokládání kružnic, ale jako průměrná vzdálenost hranových bodů z obou snímků.

Parametry osy

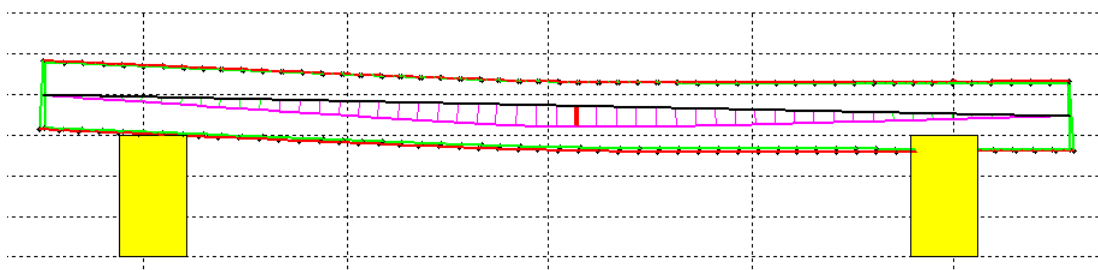
Odchylku přímosti osy je třeba vztáhnout ke konkrétní ideálně přímé ose. V této práci byly uvažovány dva přístupy:

- Porovnání s osou, která vznikne spojením středů koncových kružnic
- Porovnání s osou, která vznikne lineární regresí středových bodů všech kružnic

Velikost průhybu je v každém příčném řezu rovna vzdálenosti ideální osy od skutečné osy, tj. $|o_{\text{ideal}} - o_{\text{real}}|$ (viz obr. 5-24 a 5-26)⁹. Úhel natočení směru průhybu je počítán na základě kvadrantu, ve kterém se nachází skutečná osa výkovku vůči souřadnému systému, který je umístěn na ideální ose (viz obr. 5-25).

⁸ Byl využit skript *CircleFitByTaubin* volně dostupný v databázi Matlab Central na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22678-circle-fit-taubin-method>

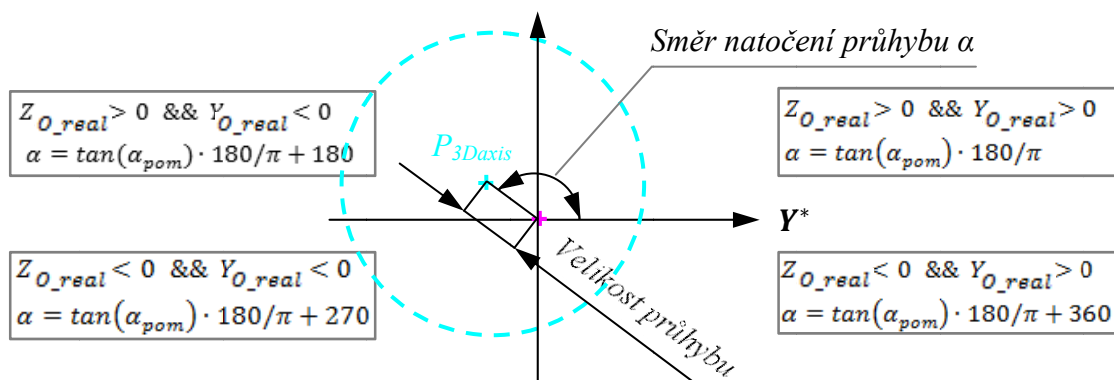
⁹ Výpočet vzdálenosti dvou křivek resp. přímky a křivky byl řešen pomocí skriptu *dist2curves* volně dostupného v Databázi Matlab Central na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34869-distance2curve>.



Obr. 4-5: Vzdálenost osy výkovku od ideální osy, která vznikne spojením koncových kružnic.

Vztah pro výpočet úhlu natočení průhybu výkovku v daném řezu.

$$\alpha_{pom} = \frac{Z_{Po_{real}} - Z_{Po_{ideal}}}{Y_{O_{real}} - Y_{O_{ideal}}} \quad (5)$$

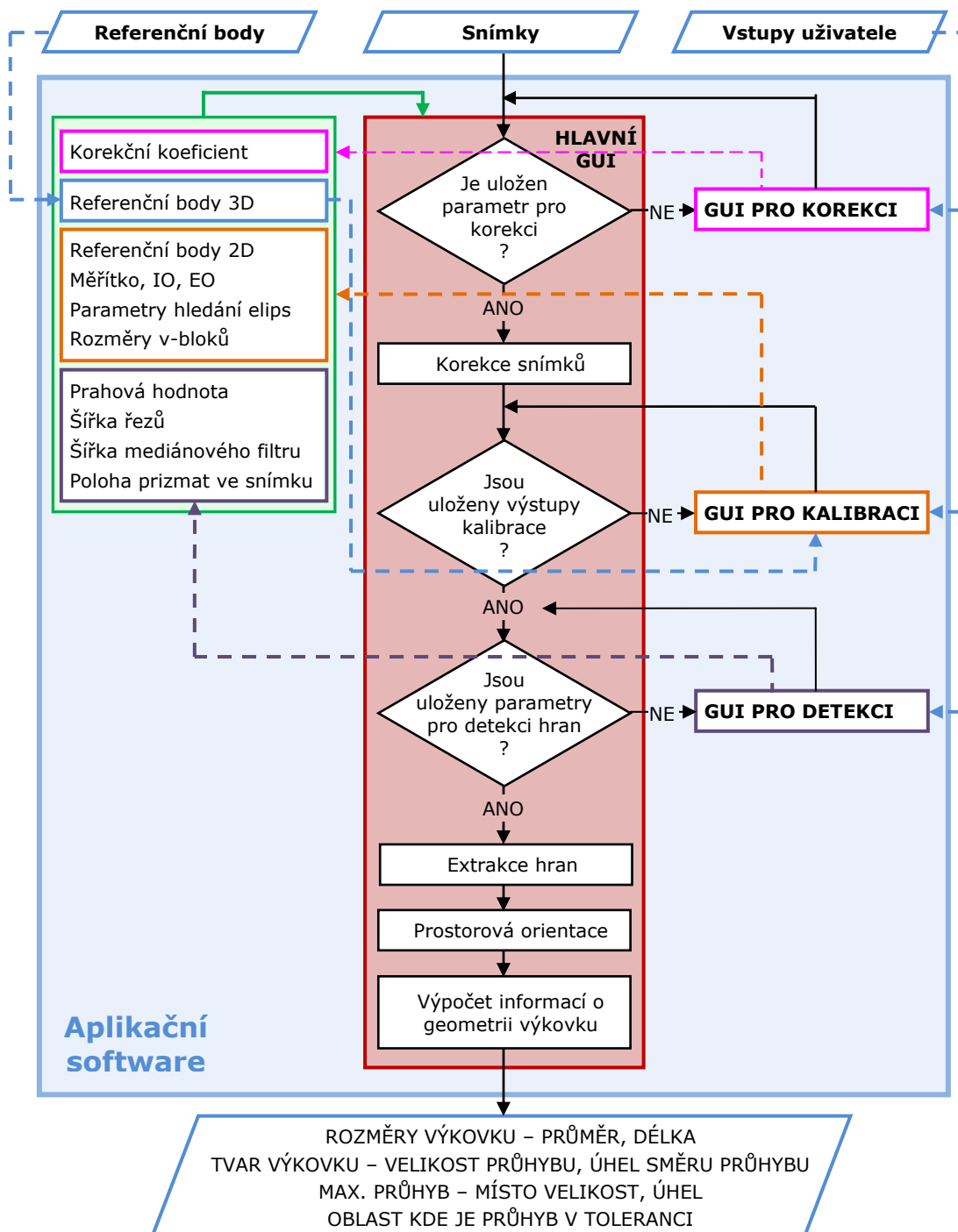


Obr. 4-6: Směr natočení průhybu a velikost průhybu osy výkovku.

V aplikaci je také možné zadat velikost tolerančního pole, které představuje válcovou obálku ideální osy. Software graficky znázorní oblast, v níž osa překračuje toleranci a vypíše její polohu vůči konci výkovku, včetně místa maximálního průhybu a jeho velikosti.

4.2 Softwarová realizace navržené metodiky v prostředí Matlab

Schéma na obrázku 5-27 ukazuje strukturu navrženého aplikačního softwaru. Aplikace je složena ze čtyř uživatelských rozhraní (GUI), které umožňují vstupy uživatele do procesu kalibrace, detekce hran a korekce zkreslení snímků. Všechny nastavené a vypočtené parametry se ukládají do externího souboru, z něhož se následně opět načítají do příslušných GUI po spuštění. Na vstupu aplikace musejí být vždy dva snímky a soubor s daty o souřadnicích referenčních bodů, které se nacházejí ve scéně. Výstupem jsou informace o tvaru a rozměrech výkovku.



Obr. 4-7: Schéma navrženého aplikačního softwaru.

4.3 Experimentální ověření navržené metodiky měření

Experimentální měření sloužilo k ověření funkčnosti navržené metodiky měření. Testy opakovatelnosti měření byly provedeny v laboratorních podmínkách na malých vzorcích před i po zahřátí na teplotu 1000 až 1200 °C. V této kapitole je také popsáno komparační měření a vyhodnocení výsledků, které slouží k porovnání s výsledky získanými pomocí navrženého systému.

4.3.1 Měřicí aparatura a měřené vzorky

Za účelem testování navržené metodiky v laboratorních podmínkách byl vyroben stend, který slouží vymezení polohy a orientace fotoaparátů vůči měřeným vzorkům (dle schématu na obr 5.3 a 5.4). V průběhu řešení disertace byly vytvořeny dvě varianty stendu pro měření vzorků s pokojovou teplotou a jeden stend pro měření vzorků s vysokou teplotou. Základními komponentami měřicí aparatury jsou:

- Dva fotoaparáty Canon EOS 500D (viz tabulka 4-1)
- Dva objektivy 18 až 55 mm
- Pracovní stůl
- Kruhové kontrastní referenční značky
- Dva v-bloky (prizmata)
- Lift s vertikálním posuvem nebo dva fotografické stativy

Tabulka 4-1: Parametry profesionální měřické kamery Kodak KAI-16000 a digitální DSLR

| Typ | Kodak KAI-16000 | Canon EOS 500D |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | CCD | CMOS |
| Rozlišení [pixel] | 4872 x 3248 (15,8 Mpix) | 4752×3168 (15,1 Mpix) |
| Aktivní velikost čipu (h×v)[mm] | 36,05 x 24,0 | 22,3 x 14,9 |
| Velikost pixelu [μm] | 7,40 × 7,40 | 4,69 × 4,70 |

Měřenými vzorky pro laboratorní testy jsou válcové trubky s délkami cca 700 a 500 mm a průměrem v rozsahu mezi 42 a 50 mm (viz tabulka 4-3 na straně 28). V tabulce i v následujícím textu jsou vzorky očíslovány vzestupně podle velikosti deformace. Vlivem cílené deformace trubek pomocí lisu mohlo dojít ke zploštění tvaru. Z toho důvodu je v tabulce 4-3 uvedena přibližná hodnota průměru. Trubky s délkou 500 mm byly použity jak pro testy za studena i za tepla. Pro ohřev trubek s délkou 700 mm nebyla k dispozici pec dostatečných rozměrů.



Obr. 4-8: Vlevo: měření vzorků za studena, vpravo: měření vzorků po ohřevu.

4.3.2 Postup měření dle navržené metodiky a softwaru

1) Příprava měření a snímkování

Fotoaparáty byly pomocí USB kabelů připojeny k počítači, následně byly ovládány vzdáleně pomocí softwaru Digital Photo Professional, který se dodává společně s fotoaparáty Canon. Před samotným měřením musí být nastavena výška fotoaparátů tak, aby při zaostření mířil středový bod snímku mezi spodní a horní hranu tyče. V průběhu celého měření je vypnuto automatické ostření a nastavena konstantní ohnisková vzdálenost, expozice a clona. Pro každou sérii měření je nastaven adresář pro uložení snímků¹⁰. Měřený vzorek je uložen do v-bloků, přibližně symetricky vůči oběma prizmatům s libovolným natočením vůči kamerám.

2) Snímkování

- *Vzorky s pokojovou teplotou*

V případě měření nezahřátých vzorků byla nastavena časová prodleva mezi snímkováním. Po spuštění již probíhalo měření automaticky a mezi jednotlivými snímky byl vzorek vždy ručně pootočen kolem své osy o libovolný úhel. Tím bylo získáno 10 párů snímků každého vzorku s různým natočením a různou polohou v prizmatech. Výška kamer byla před měřením každého vzorku mírně upravena, což se následně ukázalo jako zbytečné. Ve všech případech se vzdálenost kamer od průsečíku optických os pohybovala mezi 630 až 670 mm. Této vzdálenosti nejlépe odpovídala korekce radiálního zkreslení -0,06. Z důvodu úpravy polohy kamery před měřením nového vzorku bylo také nutné před vyhodnocením výsledků vždy znovu provést kalibraci. Kalibrace byla vypočtena ve všech případech pomocí osmi až deseti referenčních bodů. Střední kvadratická odchylka zpětně vypočtených souřadnic těchto bodů ve snímcích byla ve všech případech menší než 1 pixel. Pro všechna provedená měření byla použita totožná vstupní data se souřadnicemi referenčních bodů v prostoru získaná pomocí systému Tritop (calib_white.xls). Následující tabulka uvádí typické nastavení vstupních parametrů při měření vzorků s pokojovou teplotou.

| Měření: za studena za tepla | | | Měření: Za studena Za tepla | | | | |
|---|---------|---------|---|------|-------|------|-------|
| GUI kalibrace – parametry hledání elips: | | | GUI detekce - hranice pro detekci: | | | | |
| Prahová hodnota | 130.00 | 130.00 | Snímek | Levý | Pravý | Levý | Pravý |
| Konvexní oblast | 0.97 | 0.97 | Posun hranice pro detekci | 80 | 75 | 80 | 75 |
| Min. velikost elipsy | 300.00 | 300.00 | Šířka mezery na prizmatech | 300 | 350 | 300 | 350 |
| Max. velikost elipsy | 5500.00 | 5500.00 | Poloha prizma-levá strana | 920 | 920 | 920 | 920 |
| Parametr elipsy | 1.02 | 1.02 | Poloha prizma-pravá strana | 950 | 950 | 950 | 950 |
| GUI kalibrace - velikost pixelu: | | | GUI detekce - parametry pro detekci hran: | | | | |
| Ve směru x | 0.00470 | 0.00470 | Šířka midánového filtru | 6 | | 6 | |
| Ve směru y | 0.00469 | 0.00469 | Prahová hodnota | 20 | | 20 | |
| | | | Šířka řezů | 60 | | 60 | |

Tabulka 4-2: Typické nastavení parametrů při měření vzorků s normální i vysokou teplotou.

¹⁰ Např. 5. snímek z levé kamery třetího vzorku: Left camera \3 \0005

- ***Vzorky v zahřátém stavu***

V případě měření ohřátých vzorků nebylo možné postupovat stejným způsobem, neboť docházelo k rychlému chladnutí vzorků. Navíc bylo třeba pořídit z důvodu testování metodiky několik snímků s různým expozičním časem. Z toho důvodu byly vytvořeny vždy čtyři snímky s různou expozicí a následně byl vzorek vložen zpět do pece. Tento proces byl zopakován desetkrát pro každý vzorek. Celkem bylo vytvořeno 120 snímků pro tři různé vzorky s délkou cca 500 mm – č. 2, 3 a 6. Pomocí navrženého softwaru bylo vyhodnoceno 8 párů snímků pro každý vzorek. Poloha kamer v průběhu kompletního měření zůstala neměnná. Pomocí kalibrace byla vypočtena vzdálenost kamer 662 a 684 mm a korekční koeficient byl nastaven na velikost -0,04. Střední kvadratická odchylka zpětně vypočtených souřadnic referenčních bodů byla v tomto případě až 3 pixely (větší odchylka je zřejmě způsobena menší ostrostí hran referenčních značek, které byly na kovovém stolku vytvořeny pomocí šablony a žáruvzdorného spreje). Pro všechna provedená měření byla použita totožná vstupní data se souřadnicemi referenčních bodů v prostoru získaná pomocí systému Tritop (calib_black.xls).

Získání výsledků měření bylo zásadně pracnější než v případě měření vzorků s pokojovou teplotou. Hlavním důvodem jsou výrazné změny intenzity světla na povrchu měřených vzorků, které způsobilo velmi rychlé chladnutí okují. V případě reálných výkovků, které jsou tvořeny plným materiálem, je chladnutí několikanásobně pomalejší. Navržený software nebyl zcela optimalizován na podmínky měření za tepla. Na rozdíl od měření vzorků s pokojovou teplotou, musely být parametry detekce nastaveny individuálně téměř pro každou dvojici snímků.

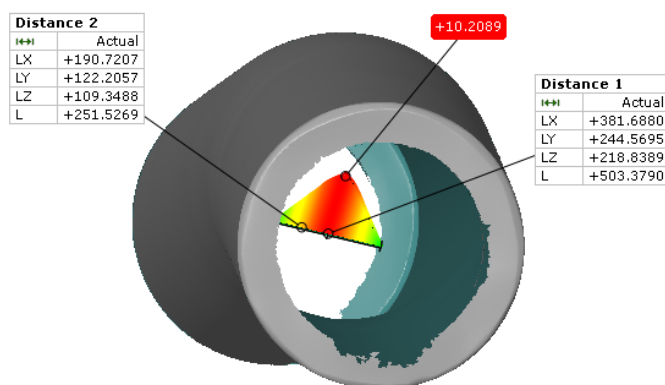


Obr. 4-9: Ohřev vzorků v indukční peci na 1200 °C.

4.3.2 Komparační měření tvaru a rozměrů testovaných vzorků

Měření tvaru a rozměrů všech vzorků pomocí systému Atos III Triple Scan. Jedná se o optický 3D skenovací systém využívající proužkovou projekci. Při měření tyčí byla použita optika, jejíž zorné pole má rozměry 320x240x240 mm a citlivost měření je 0.104 mm. V případě všech měřených vzorků byla dosažena přesnost měření (podle normy VDI 2634¹¹) vyšší jak 0,005 mm.

Pomocí 3D skenování byl získán pouze tvar tyčí. Následně bylo třeba softwarově vyhodnotit hledané parametry, tzn. rozměry, velikost maximálního průhybu a jeho polohu. Standardně se inspekce geometrie získané pomocí systému Atos provádí v softwaru Atos Professional, nicméně pro rekonstrukci prostorové osy nemá tento software vhodné nástroje. Vhodné řešení bylo po konzultaci ve firmě Mcae systems nalezeno pomocí nástrojů softwaru Tebis. Pomocí nástrojů softwaru Tebis byla vytvořena prostorová křivka, která je osou tyče. Křivka byla importována zpět do softwaru Atos, kde byly změřeny parametry osy podle prvního zmíněného přístupu v kapitole 5.5, tedy vůči ose která je vytvořena spojením konců 3D křivky. Výsledek měření vzorku číslo 2 je zobrazen na obr. 5-42. Délka výkovku byla měřena jako přímá vzdálenost obou konců skutečné osy tyče. Změřený průměr se v různých místech liší z důvodu deformace způsobené ohybem, proto je uvedena průměrná hodnota. Výsledky měření všech vzorků jsou zobrazeny v tabulce 5-5.



Tab. 4-3: Rozměry a tvar výkovku změřené pomocí 3D skeneru Atos III Triple Scan. Hvězdička u indexu znamená, že tato tyč byla použita pro testy za studena i za tepla.

Obr. 5-42: Čelní pohled na měřenou tyč a její osu v softwaru Atos Professional.

| Index | Velikost max. průhybu [mm] | Poloha max. průhybu od konce tyče [mm] | Délka [mm] | Průměr ~ [mm] |
|-------|----------------------------|--|------------|---------------|
| 1 | ~0.3 | ~334 | 699.3 | 44.4 |
| 2 * | 7.8 | 331.5 | 503.4 | 44.5 |
| 3 * | 10.2 | 251.5 | 503.4 | 49 |
| 4 | 11.59 | 369.5 | 699.9 | 44,5 |
| 5 | 13.42 | 501.3 | 698.8 | 42 |
| 6 * | 18.26 | 250.9 | 504.9 | 49 |
| 7 | 21.08 | 234. | 699.2 | 42 |

¹¹ Norma uvádí podmínky a postupy pro stanovení přesnosti 3D skenovacích systémů.

5. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

Obecné závěry a hodnocení navržené metodiky byly formulovány na základě statistické analýzy výsledků měření, která byla provedena pomocí softwaru Minitab. V následujících odstavcích jsou hodnoceny výsledky měření čtyř parametrů: maximální průhyb, jeho poloha vůči konci vzorku, průměr vzorku a jeho délka. Celkem byly zkoumány tyto parametry na sedmi vzorcích s teplotou okolí a na třech vzorcích zahřátých na teplotu 1000 až 1200 °C. Za účelem porovnání výsledků získaných pomocí navržené metodiky a softwaru bylo provedeno měření vzorků pomocí profesionálního systému Atos III TripleScan. Tento systém dosahuje řádově vyšší přesnosti než navržená metodika, neumožňuje však měření vzorků v zahřátém stavu. Výsledky získané Atosem jsou ve statistické analýze uvažovány jako referenční pro hodnocení přesnosti měření vzorků s pokojovou teplotou. Při hodnocení výsledků měření vzorků v zahřátém stavu je nutné uvažovat tepelnou roztažnost. Vliv tepelné roztažnosti na velikost průhybu a jeho polohu není možné jednoznačně a exaktně stanovit pomocí jiného dostupného způsobu měření. Z toho důvodu nebylo možné přesnost měření těchto parametrů na vzorcích s vysokou teplotou objektivně zhodnotit. Referenční hodnoty rozměrových parametrů byly vypočítány podle vztahu 38. Přibližná teplota vzorků před ohřevem byla 20°C, v ohřátém stavu 1150 °C ($\Delta t = 1130$ K). Výchozí rozměr l_0 je rozměr změřený systémem Atos. Koeficient tepelné roztažnosti pro běžnou ocel je $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]^{12}$.

$$l_1 = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (6)$$

Tab. 4-4: Vypočtené hodnoty rozměrů vzorků při teplotě cca 1150 °C.

| Vzorek č.: | 2 | | 3 | | 6 | |
|-----------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | délka | průměr | délka | průměr | délka | průměr |
| Změřené rozměry Atos - l_0 [mm] | 503,4 | 44,5 | 504,3 | 49 | 504,9 | 49 |
| Vypočtené rozměry - l_1 [mm] | ~510 | ~45 | ~511 | ~49,6 | ~511 | ~49,6 |

Data z měření vzorků s normální teplotou i v ohřátém stavu byly hodnoceny z hlediska charakteristiky polohy, variability a souměrnosti. Statistická významnost pozorovaných výsledků se byla hodnocena pomocí neparametrického Wilcoxonova testu. Testování statistické významnosti chyby měření, ukázalo, zda se s danou pravděpodobností jedná o chyby náhodné či systematické. Pro testování hypotézy o normalitě rozdělení použit Anderson-Darling (AD) test. Interpretace chyb měření byla provedena pomocí testování hypotéz o závislosti přesnosti a rozpětí výsledků na charakteristikách měřeného vzorku – jeho tvaru a délce, ale také na natočení maximálního průhybu vůči kamerám. Obecné závěry byly vyneseny s ohledem na skutečné podmínky měření a nároky na přesnost jednotlivých parametrů. Předpokládané nároky na přesnost řádově korelují se skutečnou velikostí analyzovaných parametrů: měření velikosti průhybu a průměru v řádu desetin mm; měření polohy maximálního průhybu a délky v řádu mm. Kompletní výsledky měření a jejich analýza se nachází v disertační práci.

¹² Koef. tepelné roztažnosti viz <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/37-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-kovu>

5.1 Interpretace výsledků měření vzorků s teplotou okolí

Z výsledků provedené analýzy vyplývá, že velikost chyby měření (rozdíl změřené a nominální hodnoty) a rozpětí naměřených hodnot jednotlivých vzorků je závislá na charakteru měřeného vzorku – na jeho skutečné délce a velikosti deformace. Míra závislosti na těchto dvou veličinách se u jednotlivých měřených parametrů liší. Závislost je možné popsat pomocí dvourozměrné regresní analýzy. Pokud by byl nalezen dostatečně přesný model popisující chyby měření, bylo by možné výsledky korigovat. Nicméně vytvoření kvalitního modelu by vyžadovalo měření většího počtu vzorků s rovnoměrně rozdělenými hodnotami průhybu a délky. Následující odstavce uvádějí obecné hodnocení kvality výsledků s ohledem na způsob měření a požadavky na přesnost.

• *Maximální průhyb a délka*

V současné verzi softwaru je měření těchto dvou parametrů řešeno v příčných řezech, jejichž vzdálenost je nastavitelná. Uživatel může volit šířku řezů ve snímku mezi 20 až 100 pixely, což odpovídá při dané konfiguraci kamer rozpětí 3,3 až 16,7 mm v reálném měřítku. Při experimentálním měření byla nastavena šířka řezů 60 pixelů, tj. ve skutečnosti 10 mm. Z toho vyplývá, že v ideálním případě by maximální odchylka těchto dvou parametrů měla ležet v toleranci ± 10 mm od nominální hodnoty. V případě měření délky je tento předpoklad u všech vzorků splněn. Výsledky měření polohy maximálního průhybu ukazují, že v toleranci se pohybují pouze vzorky s délkou 500 mm. V případě měření polohy má patrně délka větší vliv na kvalitu výsledků než velikost deformace.

Z výsledků je patrné, že vzorek č. 1 ukazuje několikanásobně vyšší hodnoty rozpětí výsledků měření polohy maximálního průhybu než ostatní vzorky. Příčinou je téměř nulový průhyb (cca 0,3 mm), jehož přesná velikost i poloha je již těžko měřitelná. Podle požadavků definovaných ve společnosti Žďas by měl být navrhovaný systém schopen měřit průhyb s minimální velikostí 10 mm na výkovku o délce 6 m. Pro tyto hodnoty je poměr délky a velikosti průhybu roven číslu 600, což je téměř 4x více než v případě nejmenšího testovaného průhybu. Chybu měření velmi malých průhybů by bylo třeba dále ověřit na větším počtu vzorků.

• *Průměr*

Z výsledků analýzy významnosti chyby měření vyplývá, že měření vzorku č. 1 a 3 vykazuje statisticky významné chyby. Při hodnocení těchto chyb je však nutné brát v úvahu několik aspektů:

- 1) Průměr se na různých místech vzorku liší (viz kapitola 5.8.1) a nominální hodnota průměru každého vzorku je pouze přibližná.
- 2) Hodnota průměru měřená navrženou metodikou je počítaná jako medián z průměrů změřených v každém příčném řezu.

Je tedy zřejmé, že jak nominální hodnota, tak i výsledná hodnota získaná měřením pomocí navržené metodiky je pouze přibližná a výsledky v toleranci $\pm 0,5$ mm jsou zcela dostačující. Navíc se jedná pouze o výsledky kontrolní, neboť velikost průměru musí být na začátku měření již známá (z kovacího stroje).

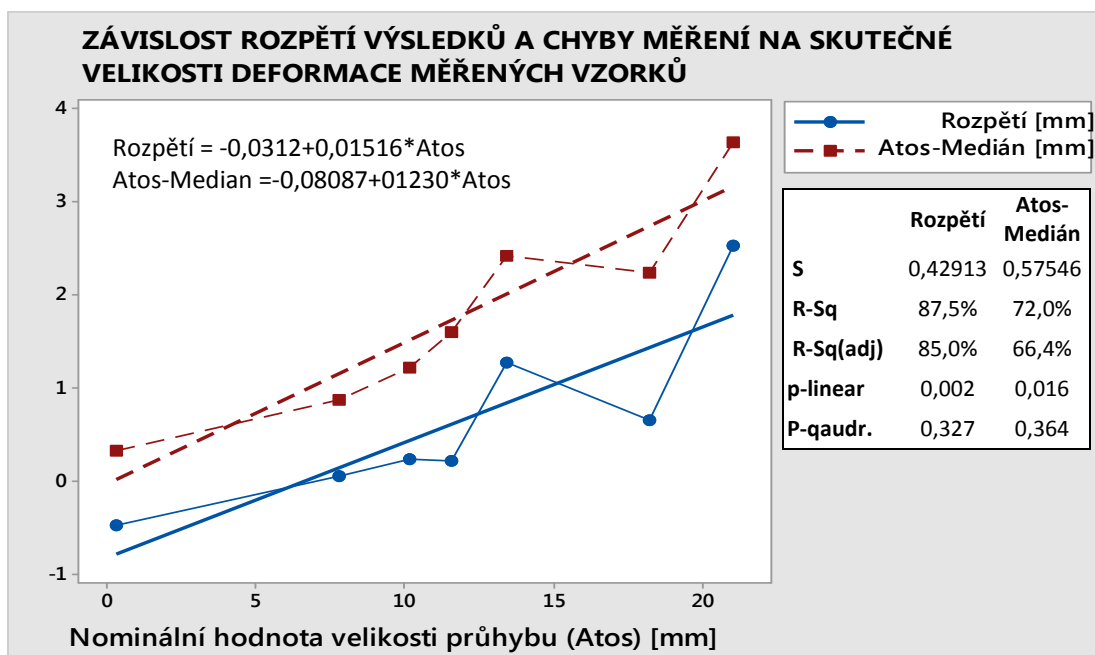
• *Velikost maximálního průhybu*

Z krabicových grafů je jednoznačně pozorovatelná závislost chyby měření i rozpětí naměřených hodnot na skutečné velikosti deformace vzorku. Přítomnost

systematické chyby u většiny měřených vzorků potvrzuje také Wilcoxonův test. Závislost výsledků na velikosti deformace (bez ohledu na délku vzorku) byla testována pomocí korelační analýzy metodou Spearman pro nenormálně rozdělená data (viz tabulka 5-1). Hodnoty pravděpodobnosti $p < 0.05$ potvrzují hypotézu o této závislosti. Pomocí regresní analýzy byl testován model, který nelépe odpovídá závislosti obou parametrů (viz obr. 5-2). Tabulka v tomto obrázku ukazuje výsledky regresní analýzy. Pravděpodobnost $p > 0,05$ v případě kvadratické závislosti poukazuje na to, že použití modelu vyššího řádu bude mít na kvalitu modelu pouze malý vliv. Proto byla použita regrese lineární. V tabulce je uvedena **směrodatná odchylka (S)** a **míra úspěšnosti proložení dat (R-Sq)**.

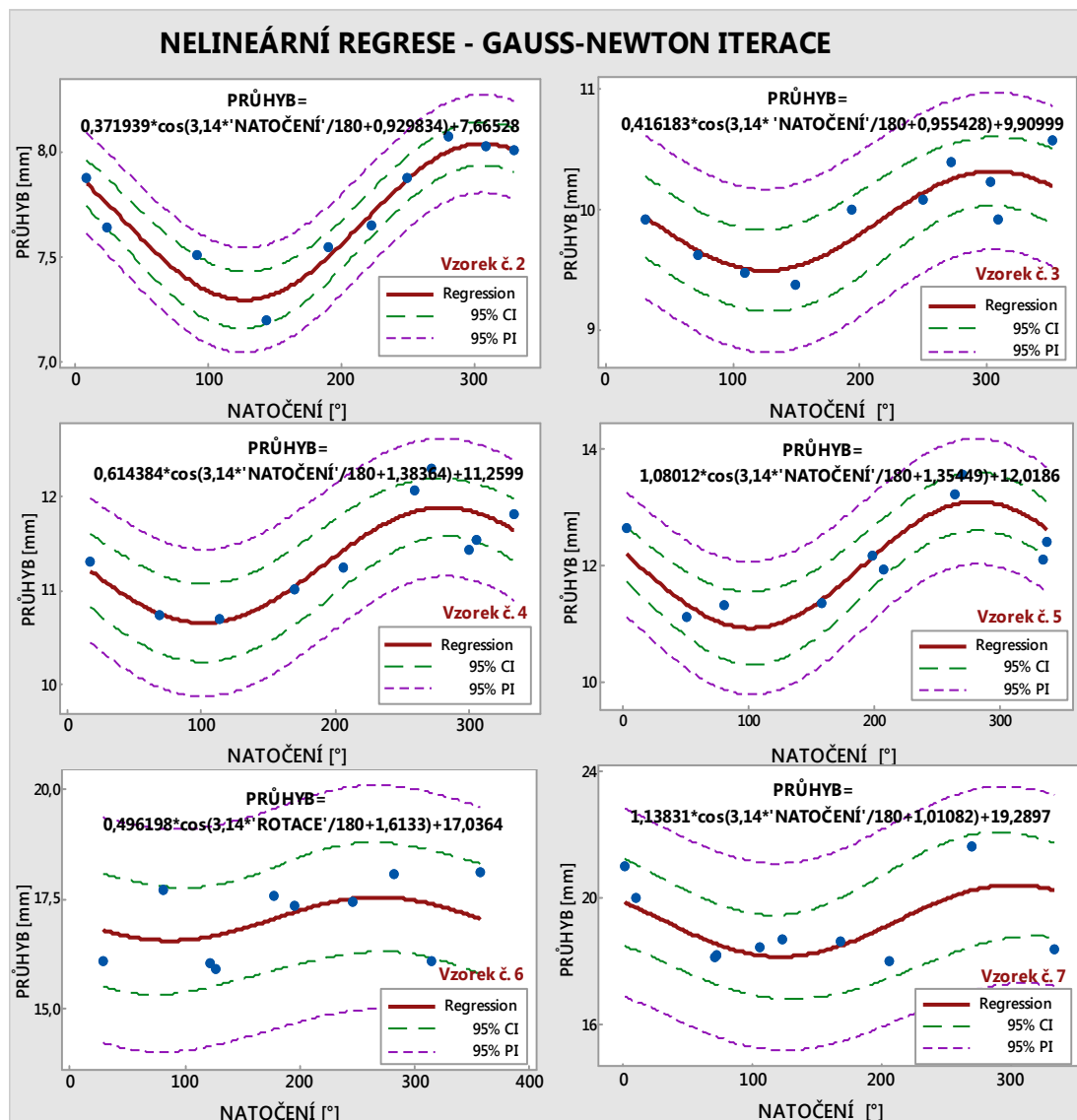
Tab. 5-1: Korelační analýza metodou Spearman.

| Korelace – Spearman: | Max. průhyb (ATOS) & Rozpětí | Max. průhyb (ATOS) & Atos - Medián |
|----------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Spearman | 0,964 | 0,929 |
| P | 0.000 | 0.003 |



Obr. 5-2: Regresní analýza zobrazuje závislost výsledků měření maximálního průhybu na jeho skutečné velikosti.

Dále byla testována hypotéza o sinové závislosti výsledků měření maximálního průhybu na směru natočení tohoto průhybu vůči kamerám. Grafy na obrázku 5-3 znázorňují provedenou regresní analýzu. Parametry sinové funkce byly vypočteny pomocí Gauss-Newtonovy iterační metody. V tabulce 5-2 jsou zobrazeny výsledky analýzy, které ukazují úspěšnost proložení dat zvolenou křivkou - součet čtverců residuí (SSE), střední kvadratickou odchylku (MSE), směrodatnou odchylku (S) a počet provedených iteračních kroků.



Obr. 5-3: Regresní analýza zobrazuje závislost výsledků měření maximálního průhybu na úhlu jeho natočené vůči kamerám.

Z výsledků je patrné, že maxima a minima funkce odpovídají u všech vzorků přibližně stejnému úhlu natočení. Tento fakt poukazuje na to, že příčinou rozptylu naměřených hodnot může být nesymetrické ustavení kamer a nedostatečně přesná kalibrace, která způsobí nepřesný výpočet měřítka. Pokud je vzorek natočen tak, že jeho maximální průhyb leží v rovině rovnoběžné s obrazovou rovinou jedné kamery, potom je výpočet velikosti tohoto průhybu závislý pouze na měřítku v této kameře. Nepřesně vypočtená měřítka v jednotlivých kamerách potom způsobí výkyvy ve výsledcích při konkrétních úhlech natočení průhybu vůči kamerám.

| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|---------|
| Iterations | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Final SSE | 0,0550833 | 0,436522 | 0,552670 | 1,12518 | 6,20051 | 8,79030 |
| MSE | 0,0078690 | 0,0623603 | 0,0789529 | 0,160740 | 0,885788 | 1,25576 |
| S | 0,0887076 | 0,249721 | 0,280986 | 0,400924 | 0,941163 | 1,12061 |

Tab. 5-2: Výsledky regresní analýzy sinové funkce pomocí Gauss-Newtonovy metody.

5.2 Interpretace výsledků měření vzorků v zahřátém stavu

Již statistická analýza vzorků s normální teplotou okolí ukázala přítomnost systematických chyb. Je tedy zřejmé, že tyto chyby se budou vyskytovat také u výsledků měření vzorků v ohřátém stavu. Z toho důvodu nebude na těchto výsledcích proveden test normality a test statistické významnosti chyby měření. Následující odstavce uvádějí obecné hodnocení získaných výsledků, uvažují a hodnotí možné vlivy na přesnost a rozptyl. Komplexní závěry jsou uvedeny v kapitole 6.2.

- ***Délka***

Stejně jako v případě měření vzorků s pokojovou teplotou se všechny výsledky měření délky pohybují v toleranci ± 10 mm. Maximální změřená odchylka od referenční hodnoty je -3,5 mm u vzorku číslo 3.

- ***Průměr***

Odchylka od referenční hodnoty je ve srovnání s výsledky měření vzorků před ohřevem více jak trojnásobná. Pohybuje se mezi 0,3 a 1,5 mm (před ohřevem: 0,1 až 0,4 mm). Tento fakt však není překvapivý. Ohřevem dojde k zvětšení rozměrů a následnému smršťování při rychlém chladnutí. Vypočtené referenční hodnoty nemusejí zcela odpovídat skutečnosti z důvodu možných nehomogenit v materiálu. Dalším zásadním důvodem vyššího rozptylu naměřených hodnot i vyšší odchylky jsou okraje, které na povrchu vzorku způsobují nerovnosti. Ty se projeví také na detekovaných hranách.

- ***Velikost maximálního průhybu a jeho poloha***

Uvažujeme-li porovnání výsledků měření polohy maximálního průhybu s referenční hodnotou, největší změřená chyba je 8 mm u vzorku číslo 2. Všechny výsledky měření polohy průhybu se pohybují v toleranci ± 10 mm. V případě měření velikosti maximálního průhybu, byla naměřena maximální odchylka od referenční hodnoty 2,3 mm u vzorku číslo 6, což je hodnota více jak trojnásobně vyšší než v případě měření tohoto vzorku před ohřevem. Obecné hodnocení výsledků měření průhybu je však třeba brát pouze orientačně, protože přesné referenční hodnoty nejsou k dispozici.

6 DISKUSE A VYPLÝVAJÍCÍ NÁVRHY NA OPTIMALIZACI

Experimenty prokázaly funkčnost softwaru a poukázaly na přítomnost systematických chyb. Interpretace těchto chyb umožní cílenou modifikaci softwaru a tím jeho optimalizaci. Základní vliv na dosaženou přesnost měření má samozřejmě rozlišení ve snímku. Do jisté míry je tedy přesnost měření možné ovlivnit volbou kamery a vzdálenosti měření. Další vliv na výsledky měření má přesnost kalibrace, přesnost prostorové orientace, ale také např. způsob interpolace dat a vyhlazení detekovaných hran, nebo natočení řezných rovin, z nich je počítána skutečná osa výkovku. Následující body se zabývají vhodností použití jednotlivých metod, jejich vlivem na přesnost a možnostmi optimalizace.

- ***Kalibrace lineárních parametrů kamery***

Výpočet parametrů kamery byl řešen pomocí lineárního modelu, konkrétně metodou Přímé lineární transformace (DLT). Obecně je lineární řešení kalibrace výpočetně jednoduché a rychlé, ale méně přesné než metody nelineární (viz kapitola 2.5.2). Malá odchylka referenčního bodu detekovaného ve snímku může způsobit velké změny výsledků. Problémem je přeurčení soustavy rovnic. V systému DLT rovnic s jedenácti neznámými je pouze deset z nich nezávislých. Řešení tohoto problému představuje Modifikovaná přímá lineární transformace (MDLT), kterou navrhl Hatze (1988)¹³. Další možností je použití některé z nelineárních metod, které jsou založeny na rovnicích kolinearity.

- ***Kalibrace nelineárních parametrů kamery***

Vzhledem k použití neměřické kamery na experimentální testování metodiky byla zvolena metoda korekce zkreslení pomocí inverzního modelu podle [52]. Algoritmus byl převzat z volně dostupné databáze Matlab Central. Korekční parametr byl volen uživatelem na základě sledování střední kvadratické odchylky polohy referenčních bodů, které byly zpětně vypočteny pomocí výsledků DLT na korigovaných snímcích. Střední kvadratická odchylka při použití nekorigovaných snímků dosahovala více než 10 pixelů, v případě korigovaných obvykle méně jak 1 pixel. Tato metoda se pro účely testování metodiky jeví jako dostatečně přesná. Kvalita korekce by mohla být ověřena porovnáním s výsledky výpočtu DLT na snímcích korigovaných např. pomocí softwaru Digital Photo Professional. V případě měření v reálných podmínkách s metrickými kamerami by bylo třeba vytvořit přesný dvojrozměrný či trojrozměrný model zkreslení pro danou kameru a objektiv (viz kapitola 5.2.1).

- ***Detekce hran***

Algoritmus detekce hran byl testován především na vzorcích v nezahřátém stavu. Měření, při němž bylo vyhodnoceno 70 párů snímků, prokázalo, že navržený algoritmus pracuje s minimálními vstupy uživatele – během vyhodnocování nebylo ve většině případů nutné měnit nastavitelné parametry. Problémy nastávaly, pokud byl měřen vzorek s velkým průhybem. Jelikož je kontrola návaznosti řešena v řezech, bylo nutné zvolit vhodné okrajové podmínky pro daný rozsah šířky řezů,

¹³ **Hatze, H.** High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. *J. Biomechanics*, 1988 Vol. 21, s. 533-538.

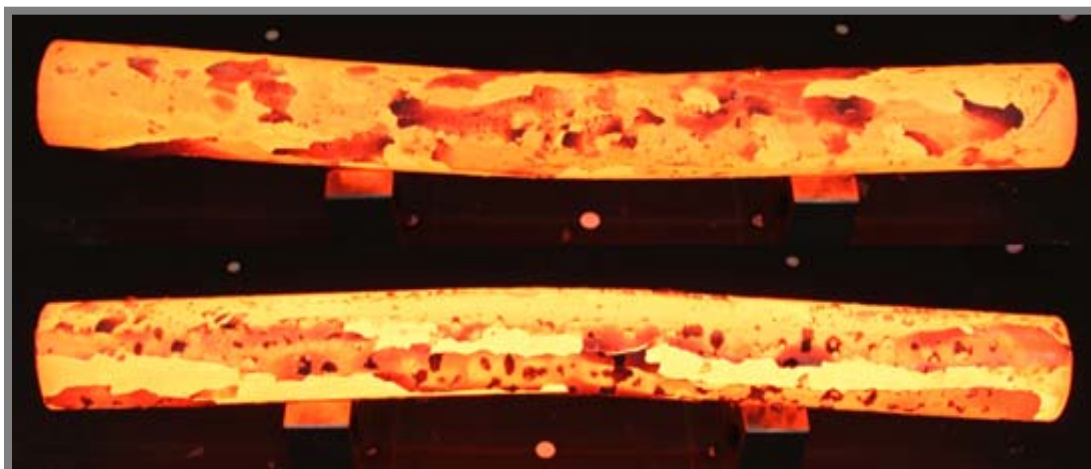
při jejichž porušení bude hranový bod opraven. Nastavené podmínky však u některých snímků vzorků s největším průhybem způsobovaly chybnou opravu hrany. Nicméně tak velký poměr deformace k délce by se na skutečných rotačních výkovech nevyskytoval.

Navržený algoritmus detekce hran byl testován také na 30ti párech snímků se vzorky v zahřátém stavu. U vzorku číslo 2 nevznikaly při ohřevu výrazné a rychle chladnoucí okuje, díky tomu byla intenzita povrchu poměrně rovnoměrná. Při těchto podmínkách fungovala kompletní detekce hran spolehlivě – vstupní parametry nebylo téměř nutné měnit.



Obr. 6-1: Příklad snímků vzorku číslo 2 ohřátého na teplotu 1200 °C. Expoziční čas 1/40 s., ohnisková vzdálenost 18 mm, clona F7.1.

V případě vzorků číslo 2 a 6 byly okuje mnohem výraznější. Parametry detekce musely být nastavovány individuálně u jednotlivých párů snímků. Nalezení vhodné prahové hodnoty a šířky mediánového filtru bylo problematické především v případě vstupní detekce, která slouží k nalezení konců vzorku v horizontálním směru. Algoritmus vstupní detekce tedy musí být upraven, tak aby pracoval bez vstupu uživatele spolehlivě při širším spektru podmínek.



Obr. 6-2: Příklad snímků vzorku číslo 3 a 6 ohřátého na teplotu 1200 °C. Expoziční čas 1/40 s., ohnisková vzdálenost 18 mm, clona F7.1.

Navržený algoritmus hlavní detekce s opravou chybně detekovaných hran fungoval ve většině případů spolehlivě. Pro zvýšení robustnosti celé detekce hran, by bylo vhodné zajistit rovnoměrnost intenzity osvětlení v okolí kolem měřeného dílu i v jednotlivých snímcích. Řešením by mohla být kombinace různě exponovaných snímků.

- ***Prostorová orientace***

Statistická analýza ukázala, že změřené hodnoty průhybu oscilují kolem nominální hodnoty v závislosti na směru natočení vůči kamerám (změřená maxima i minima odpovídala u více vzorků přibližně stejnému úhlu natočení). Tento fakt poukazuje na to, že příčinou rozptylu naměřených hodnot může být nesymetrické ustavení kamer a nedostatečně přesná kalibrace, která způsobí nepřesný výpočet měřítka. Tento problém je možné eliminovat přesnou montáží kamer a zavedením sofistikovanější metody kalibrace.

Dále byla ověřena hypotéza o závislosti chyby měření průhybu na skutečné velikosti tohoto parametru - s rostoucí velikostí deformace tyče, roste také velikost chyb měření (rozdíl změřené a referenční hodnoty). Tento jev byl uvažován a teoreticky popsán v kapitole 5.2 již při návrhu metodiky. Pro konfiguraci, která odpovídala podmínkám provedených experimentů, byla velikost chyby teoreticky stanovena na 0,3 mm u vzorku s průhybem 10 mm a 0,6 mm u vzorku s průhybem 20 mm (viz disertační práce str. 54). Podobný průhyb má vzorek č. 2 (10,2 mm) a vzorek číslo 6 (18,25 mm). U vzorku č. 2 byl výsledný rozdíl mediánu a nominální hodnoty 0,23 mm, v případě vzorku č. 6 byla tato hodnota 0,66 mm. Hodnoty mediánu tedy přibližně odpovídají predikci. Vzhledem k tomu, že předpokládanou závislost velikosti chyby měření na velikosti měřeného průhybu potvrdilo experimentální měření, dalším krokem ke zvýšení přesnosti výsledků by bylo zavedení korekčního modelu.

- ***Vyhlazení hran***

V současné verzi navrženého softwaru byla použita metoda klouzavého průměru (moving) na detekované hrany a metoda Savitzky-Golay (sgolay) na výslednou osu. Metoda Savitzky-Golay je obdobou metody klouzavého průměru (moving), kde koeficienty filtru jsou vypočteny pomocí regrese polynomickeho modelu daného řádu metodou nejmenších čtverců. Stupeň vyhlazení byl použit 0.15 a stupeň polynomu 2. V průběhu návrhu aplikace byly testovány také ostatní možnosti vyhlazování. Kromě metody sgolay dávala při vhodném velmi podobné výsledky metoda (rflowess). Při vhodném nastavení byly výsledky různých metod vyhlazování velmi podobné, případně se lišily v řádech setin mm, což je z důvodu následného zaokrouhlování nepodstatné. Velký vliv na výsledky má spíše velikost vyhlazení. Budoucí optimalizace softwaru, by měla počítat s nastavitelným parametrem velikosti vyhlazení.

- ***Natočení řezných rovin rovnoběžně se směrníci osy***

V současné verzi softwaru, je osa měřeného vzorku počítána pomocí detekovaných hranových bodů v jednotlivých řezech iteračně - v prvním kroku jsou normály řezných rovin rovnoběžné s osou x světového souřadného systému. Hranové body ležící v těchto řezech jsou proloženy kružnicí. Střed kružnic představují body na hledané ose. Následně jsou vypočteny nové řezné roviny, jejichž normála je

rovnoběžná se směnicí osy a v těchto rovinách jsou nalezeny nové hranové body. V současné verzi softwaru je nastaven výpočet pouze jednoho iteračního kroku. Hlavním důvodem je výpočetní zpomalení procesu měření a také poměrně malý vliv na výsledky (v řádech desetin mm).

Shrnutí vlivů na dosaženou přesnost měření průhybu:

Hlavní vlivy:

- *Rozlišení ve snímcích*
- *Přesnost kalibrace – výpočet parametrů kamery a měřítka*
- *Prostorová orientace - eliminace asymetrického ustavení kamer a eliminace lineární závislosti velikosti chyby měření na velikosti průhybu (aproximace měřítka)*
- *Spolehlivost detekce hran - hrubé chyby náhodného charakteru*

Další vlivy:

- *Metoda vyhlazení detekovaných hran a metoda interpolace dat*
- *Natočení řezných rovin, v nichž je počítána výsledná osa*

Shrnutí hlavních bodů pro další optimalizaci softwaru:

- *Implementovat modifikovanou metodu přímé lineární transformace*
- *Zavést korekci aproximace měřítka (závislost velikosti chyby měření na velikosti průhybu)*
- *Zvýšit odolnost vstupní detekce a předzpracovat snímky tak, aby byla intenzita osvětlení rovnoměrná*
- *Eliminovat nesymetrickou polohu kamer přesnou montáží*
- *Umožnit volbu velikosti vyhlazení hran, případně volbu výpočetního funkce přímo v GUI pro měření*
- *(Umožnit nastavitelnost parametrů detekce přímo v GUI pro měření)*
- *(Vyřešit automatické přiřazení detekovaných referenčních bodů při kalibraci)*

Návrh dalších experimentů:

- *Vytvořit komplexnější hodnocení výsledků pomocí měření většího počtu vzorků s různými charakteristikami - např. vzorky s deseti různými průhyby, pro každý průhyb např. pět různých délek a deset různých natočení (tj. až 500 měření).*
- *Provést měření v reálných podmínkách*

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byl *návrh metodiky měření přímosti osy rotačních výkovků*, dle stanovených kritérií. Na základě analýzy odborných zdrojů, byla navržena metodika měření založená na pasivní fotogrammetrii a analýze obrazu. Systém založený na těchto principech dosud nebyl popsán, ačkoli na možnost jejich využití pro zmíněnou aplikaci poukazují některé publikace v kapitole 2.3. Optický systém založený na pasivní fotogrammetrii a analýze obrazu by mohl konkurovat již zavedeným systémům především rychlostí měření a cenou. První fáze řešení práce spočívala ve volbě a návrhu dílčích metod a jejich zavedení do programovacího jazyka. V práci byl navržen vlastní algoritmus pro detekci hran, prostorovou orientaci a výpočet hledaných parametrů. Dílčí metody byly sestaveny do komplexní softwarové aplikace, která umožňuje vyhodnotit odchylku přímosti osy, i rozměry měřených dílů, během několika vteřin.

Dalším hlavním cílem práce bylo *experimentální ověření funkčnosti navržené metodiky*. Pro tyto účely byla navržena a vyrobena měřicí aparatura. Testování probíhalo v laboratorních podmínkách na vzorcích malých rozměrů. Nejdříve bylo realizováno měření na vzorcích bez ohřevu, následně na vzorcích s teplotou 1000 až 1200 °C. Výsledky měření vzorků v nezahřátém stavu byly porovnány s výsledky, které byly získány 3D skenováním a následným softwarovým zpracováním dat v softwaru Tebis a Atos.

V reálných podmínkách jsou měřeny výkovky s poměrem průhybu k délce, který odpovídá vzorkům číslo 2, 3, 4 (přibližně 10x větší měřítko). Výsledky měření průhybu u těchto vzorků vykazují chybu mediánu z deseti měření 0,05 až 0,23 mm. Poloha průhybu a délka zmíněných vzorků byla ve všech případech změřena s odchylkou do 10 mm, tedy s menší odchylkou než je šířka příčných řezů, která byla v softwaru nastavena. Chyba měření na průměru u vzorků měřených před ohřevem se pohybuje do 0,4 milimetru. V případě vzorků měřených za tepla je odchylka přibližně trojnásobná. Příčinou je přítomnost okují na povrchu vzorku. Přesto, že byly dosud provedeny pouze testy v laboratorních podmínkách na vzorcích malých rozměrů, výsledky poukazují na to, že dosažitelná přesnost navržené metodiky bude vyhovující také v reálných podmínkách. Experimentální měření ověřilo funkčnost navržené metodiky, statistická analýza následně poukázala na možnosti optimalizace jednotlivých částí softwaru.

Všechny *analyzované vlivy na dosahovanou přesnost měření včetně návrhů na optimalizaci* jsou popsány v kap. 6. Statistická analýza potvrdila závislost odchylky měření na skutečné velikosti průhybu, tak jak bylo predikováno na již počátku návrhu metodiky. Řešením tohoto problému je zavedení korekčního modelu, který by byl vytvořen na základě většího počtu měření vzorků s různým tvarem a rozměry. Dalším doporučeným optimalizačním krokem je nahrazení použité kalibrační metody některou z nelineárních metod. Tím dojde ke zvýšení přesnosti a snížení rozptylu výsledků. Zkvalitnění výsledků měření by zajistila také přesná montáž profesionálních měřičských kamer. Spolehlivost navržené metody detekce hran se projevila zejména při vyhodnocování měření vzorků s vysokou teplotou. Ukázalo se, že není možné provést vyhodnocení celé série snímků se stejnými parametry detekce. Algoritmus pro detekci hran je třeba upravit tak, aby dosahoval vyšší spolehlivosti při větším rozpětí nastavených parametrů. Prvním krokem by mělo být zajištění rovnoměrné intenzity osvětlení jak v jednotlivých snímcích, tak i uvnitř snímků samotných. Všechny vytyčené cíle jsou autorkou považovány za splněné.

8 SEZNAM LITERATURY

Optické metody měření tvaru objektů

- [1] BERNARD, A. Reverse engineering for rapid product development: a state of the art. In: *International Conference on Optical Instruments and Technology: Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology, and Inspection. Proc. of SPIE 1999*, vol. 3835, s. 50-63.
- [2] LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Fundamental methods, s. 1-25. ISBN 978-184995-057-2.
- [3] REMONDINO, F.; EL-HAKIM, S. Image-Based 3D Modeling: A review. *The photogrammetric Record*. September 2006, vol. 115, no. 21, s. 269–291.
- [5] KALOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. Optické metody měření 3D objektů. In: *Elektro revue* [online]. 12. 4. 2005 [cit. 2014-08-05]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.1.4>>.
- [6] VOJÁČEK, Antonín. PMD senzor & 3D měření vzdálenosti - 1. část "Princip". In: *Automatizace.hw.cz* [online]. 2006-07-03 [cit. 2011-06-23]. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2006070301>>.
- [7] CHEN, F., BROWN, G. M. AND SONG, M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Optical Engineering*, 2000, vol. 39, no. 1, s. 10-22.

Fotogrammetrie – základní pojmy, rozdělení a aplikace

- [12] Géodésie Maintenance Services. *Géodésie Maintenance Services* [online]. 1998 [cit. 2011-06-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.geodesie-maintenance.com/us/>>.
 - [13] GOM. *GOM: Optical Measurement Techniques* [online]. 2011 [cit. 2011-06-28]. Dostupné z: <<http://www.gom.com/>>.
 - [14] JIANDONG, Z., LIYAN, Z. AND XIAOYU, D. Accurate 3D Target Positioning in Close Range Photogrammetry with Implicit Image Correction. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, vol. 22, no. 6, s. 649-657.
 - [15] Reinshaw. *Reinshaw* [online]. 2001-2011 [cit. 2011-06-28]. Dostupné z: <<http://www.reinshaw.com/en/reinshaw-touch-probes-rotary-encoders-linear-encoders-angle-encoders-laser-calibration-dental-cad-cam-raman-spectroscopy-and-surgical-robots--1030>>.
 - [16] Metronor. *Metronor* [online]. 2007 [cit. 2011-06-28]. Dostupné z: <<http://www.metronor.com/>>.
 - [17] AICON. *AICON* [online]. 2011 [cit. 2011-06-28]. Dostupné z: <<http://www.aicon3d.de/en/start.html>>
-

-
- [18] Nikon Metrology. *Nikon Metrology NV* [online]. 2011 [cit. 2011-06-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.nikonmetrology.com/products>>.

Metody měření tvaru výkovků s vysokou teplotou

- [19] SIEMER, E., NEISCHWITZ, P., KOPP, R. Quality optimized process control in open die forging. *Stahl und Eisen*, 1986. Vol. 106, no. 8, s. 383–388.
- [20] NYE, T. J., ELBADAN, A. M., BONE, G. M. Real-time process characterization of open die forging for adaptive control. *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, 2001, vol. 123, no. 4, s. 511–516.
- [21] TIAN, Z. at al. Dimension measurement of hot large forgings with a novel time-of-flight system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 44, no. 1, p. 125–132.
- [22] MÄTTÄ, K., KOSTAMOVARA, J. AND MYLLYL, R. Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques. *Applied optics*, 1993, vol. 32, no. 27, s. 5334–5347.
- [23] MITEQ. *FERROTRON A MINTEQ DIVISION* [online]. c2011 [cit. 2011-07-25]. LaCamForge. <http://www.minteq.com/fileadmin/user_upload/minteq/PDF/M-FE-30-PDF-Forge__Jan2011_.pdf>.
- [24] MERMEC GROUP. *MERMEC GROUP* [online]. c2009 [cit. 2011-07-25]. Open DieForgings. <https://www.mermecgroup.com/download.php?f=/mermec-incorso/images/File/newsletter/InsightSteel_vol1_n1_eng.pdf>.
- [25] SINTEF. *SINTEF* [online]. November 19. 2008 [cit. 2011-07-25]. Measuring 3D shape of steel shafts during forging. <<http://www.sintef.no/home/Information-and-Communication-Technology-ICT/Optical-measurement-systems-and-data-analysis-/Projects/Measuring-3D-shape-of-steel-shafts-during-forging/>>.
- [26] JIA, Z. at al. An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, no. 2, s. 267–271.
- [27] LIU, W. at al. Fast dimensional measurement method and experiment of the forgings under high temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011. vol. 211, Issue 2, s. 237–244.
- [28] DWORKIN, S.B. AND NYE, T.J. Image processing for machine vision measurement of hot formed parts. *Journal of materials processing technology*, 2006, vol. 174, no. 1-3, s. 1-6.
- [29] Ch. Hu, B. Liu, X. Song. A novel edge detection approach used for online dimensional measurement of heavy forging. In: *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Applications*, Proc. of SPIE 2008, vol. 7160.
- [30] YAMAUCHI, M. Errors in optical shape measurement caused by a high-temperature atmosphere. *Opt. Eng.*, Sep 02, 2009, vol. 48, no. 9.

9 PUBLIKACE A PRODUKTY AUTORA

Publikace k problematice disertační práce:

1. ZATOČILOVÁ, A.; POLIŠČUK, R.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. Photogrammetry based system for the measurement of cylindrical forgings axis straightness. In *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII. Proceedings of SPIE*. Munich, Germany: Proc. SPIE, 2013. s. 87881L- 1 (88781L-10 s.) ISBN: 9780819496041. ISSN: 0277- 786X.)
2. ZATOČILOVÁ, A.; POLIŠČUK, R.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. An approach to the shape deviation measurement of cylindrical forgings. In *53rd International Conference of Mechine Desing Departments*. 1. Brno University of Technology, Antonínská 548/1, Brno 601 90, Czech Republic: Brno University of Technology, 2012. s. 331-338. ISBN: 978-80-214-4533- 8.

Další publikace z oblasti reverzního inženýrství a metrologie:

3. ZIKMUND, T.; BRADA, M.; ZATOČILOVÁ, A.; PETRILAK, M.; KAISER, J. Kontrola rozměrů redukce objektivu a kamery pomocí rentgenové počítačové tomografie. *Jemná mechanika a optika*, 2014, roč. 59, č. 6- 7, s. 186-189. ISSN: 0447- 6441.
4. ZATOČILOVÁ, A.; KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. Experimental verification of deformation behavior of towing hitch by optical measurement method. In *Book of Proceedings of 54th International Conference of Machine Design Departments*. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. s. 365-374. ISBN: 978-80-7372-986- 8.
5. KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; KOUTECKÝ, T.; ZATOČILOVÁ, A.; JANDA, M. 3D Digitalization Of The Human Body For Use In Orthotics And Prosthetics. *An international Journal of Science, Engineering and Technology, World Academy of Science Engineering and Technology*, 2012, roč. 2012, č. 72, s. 1000-1005. ISSN: 2010- 376X.
6. ZATOČILOVÁ, A.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. Využití 3D optických technologií měření a reverzního inženýrství při výrobě formy pro ultra lehké letadlo. In *Sborník referátů. 52. konference kateder, částí a mechanismů strojů s mezinárodní účastí*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2011. s. 306-311. ISBN: 978-80-248-2450- 5.

Produkty:

1. ZATOČILOVÁ, A.: FOTO-FORG; *Laboratorní stanice pro měření tvarových odchylek výkovků pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu*. Místnost A4/503; ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO, Česká Republika.
 2. KOUTECKÝ, T.; ZATOČILOVÁ, A.; PALOUŠEK, D.: 3DOS-UK- 1; *3D optický skener*. Laboratoř č. A4/503, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO, Česká Republika.
-

10 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Ing. Aneta Zatočilová, nar. 1986 v Brně

Vzdělání:

- 2010 - 2014 Doktorské studium na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně, odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií. Téma disertační práce: Měření a vyhodnocování přímosti osy rotačních výkovků pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu.
- 2008 - 2010 Magisterské studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, obor Konstrukční inženýrství. Téma diplomové práce: Konstrukce formy pro výrobu trupu ultralehkého letounu.
- 2005 - 2008 Bakalářské studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, obor Strojní inženýrství. Téma Bakalářské práce: Využití tepelných solárních kolektorů pro ohřev bazénu – návrh aplikace.
- 2000 - 2005 Střední průmyslová škola SPŠ Sokolská 1, Brno, obor počítačová grafika. Studium ukončeno maturitní zkouškou s vyznamenáním.

Výuka cvičení v předmětech:

- Reverzní inženýrství a optická digitalizace (ZRI-A)
- Parametrické modelování – Inventor, Catia, Rhinoceros (ZM1)
- Konstrukční seminář – Solidworks (ZKS)
- Konstrukční projekt (ZKP)
- Konstrukční projekt II (ZKR)
- Inženýrský projekt (ZIP)
- Konstruování a CAD (4KC)
- CAD systémy 1 (RS1)
- Řízení projektu (ZRS)

Praxe a zaměstnání:

- 2012 - dosud - technický pracovník na projektu NETME VMDT
- 2010 - 2013 Mcae systems, Kuřim - plošné modelování a reverzní inženýrství (Tebis), 3D skenování (Atos), fotogrammetrie (Tritop) - externí spolupráce.
- 2012 - 2014 - technický pracovník na projektu OPVK CZ.1.07/2.2.00/28.0278
- 2011 - 2012 - technický pracovník na projektu OPVK CZ.1.07/2.4.00/12.0030
- 2009 - Pomocný konstruktér (formou studentské praxe), ABB Brno

Projekty:

- 2013 FRVŠ, G1 - Inovace a rozvoj výuky reverzního inženýrství a 3d optické digitalizace na FSI VUT v Brně (hlavní řešitel).
- 2011 Specifický výzkum, Juniorský - Aplikace metod vyhodnocování tvarových odchylek výkovků pomocí analýzy obrazu (hlavní řešitel).
- 2011 - 2013 - Specifický výzkum, Standardní - Vývoj zobrazovacích metod pro prezentace designérských objektů ve virtuálním prostředí (spoluřešitel).
- 2012 - Specifický výzkum, Juniorský - Tvorba strukturované geneze artefaktu metodami optické digitalizace (spoluřešitel).

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem metodiky měření tvaru a rozměrů rotačně symetrických výkovků. Většina dostupných bezdotykových systémů není možné pro tuto aplikaci použít zejména z důvodu vysoké teploty a velkých rozměrů měřených polotovarů. V současné době existuje pouze několik komerčních systémů, které jsou určeny pro toto specifické měření. Tyto systémy jsou založeny na principu vyhodnocování časové odezvy vyslaného modulovaného signálu. Odborné prameny uvádějí také další přístupy k měření založené na principu triangulace a analýzy obrazu. Výhodou systému založeného na těchto principech by měla být především rychlost měření a zásadně nižší cena. V práci je popsán aktuální stav výzkumu a vývoje a navržen vlastní přístup, který je založen na pasivní fotogrammetrii a analýze obrazu. Hlavní část práce je věnována návrhu dílčích metod a jejich zavedení do programovacího jazyka v prostředí Matlab. Funkčnost metodiky a softwaru byla ověřena měřením válcových trubek malých rozměrů v laboratorních podmínkách. Na základě statistické analýzy výsledků jsou diskutovány a hodnoceny dílčí metody a navrženy kroky, které zajistí zvýšení přesnosti a snížení rozptylu výsledků. Optimalizace a další vývoj této metodiky by mohli vést k sestavení profesionálního měřicího systému určeného pro tuto vysoce specifickou aplikaci.

ABSTRACT

The thesis deals with methodology proposal for shape and dimension measurement of rotationally symmetric forgings. Most of available non-contact systems are not possible to use for this purpose, mainly due to high temperatures and large dimensions of forgings. Only a few commercial systems which are designed for this specific measurement are currently in the market. These systems are based on a principle of evaluating time response of posted modulated signal. However, scientific literature shows also other approaches to the measurement, which are based on principle of triangulation and methods of image analysis. Advantage of systems based on these principles should be especially measurement speed and significantly lower price. The paper describes current state of research and development in this area and proposes a new approach which is based on passive photogrammetry and image analysis. The core of the work is devoted to the design of partial methods and their implementation in the Matlab programming language. Functionality of the methodology and the software has been verified by measuring cylindrical tubes of small dimensions in laboratory conditions. The designed methods were discussed and evaluated based on statistical analysis of the measurement results, and further steps to increase the accuracy and reduce the spread of results were suggested. Optimization and further development of this methodology could lead to the design a professional measuring system intended for this specific application.
